

Grundlagen der medizinischen Biophysik

4. Vorlesung

Die Mechanik des Drucks

© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

1

1

Physik des menschlichen Körpers

- Wetten, dass 15 Autos über einen Bauch fahren können und man dabei „O sole mio“ singen kann?
- Wette bei „Wetten, dass...?“ aus 2009



© Jan-Philipp Emmermann



Wintersemester 2019

2

2

Physik des menschlichen Körpers

- Welche Kraft wirkt auf den Bauch?
 - Ein Rad drückt mit ca. **2754 Newton** auf den Bauch
- Im Vergleich:
 - Eine 7,62x51 mm NATO Gewehrkugel übt beim Auftreffen eine Kraft von ca. **2700 Newton** aus
- Frage: Wieso reißt die Bauchdecke bei der Wette nicht auf?



Kraft mit der das Auto (vermutlich Opel Corsa aus 2009) auf den Bauch drückt:



© Jan-Philipp Emmermann

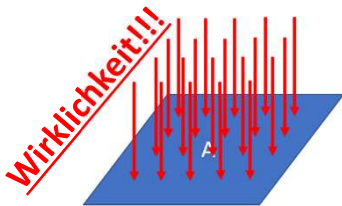
Wintersemester 2019

3

3

Was ist Druck? – Erklärung

- Die Kraft alleine reicht nicht um die Wechselwirkung zwischen zwei Objekten zu beschreiben
- Es macht einen Unterschied, auf welcher Fläche die Kraft auf das Objekt einwirkt
- Die physikalische Größe **Druck** berücksichtigt die Fläche



© Jan-Philipp Emmermann

$$p = \frac{F}{A} \left(= \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \right)$$

p = Druck (Pascal)
 F = Kraft (Newton)
 A = Fläche (Quadratmeter)

Wintersemester 2019

Dies ist das Grundprinzip! Unbedingt merken, lernen und verstehen!!!

Andere verwendete Einheiten sind:
 Bar: 1 bar = 10^5 Pa
 Atmosphäre: 1 atm = $1,01 \cdot 10^5$ Pa
 Millimeter Quecksilbersäule: 1 mmHg = 133 Pa

Druckkraft: Dem Druck wird eine vektorielle Größe gegeben.
 (quasi die Kraft, die der Druck in eine Richtung ausübt) ($F_D = p \cdot A$)

5

4

Physik des menschlichen Körpers

Auto

•

$$p = \frac{F}{A}$$



© Jan-Philipp Emmermann

Gewehrkugel

•

$$p = \frac{F}{A}$$



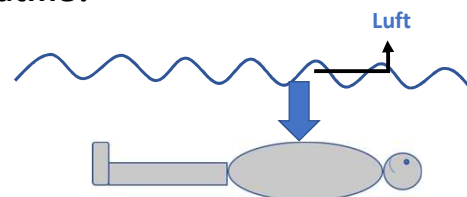
6

Wintersemester 2019

5

Physik des menschlichen Körpers

- Im Urlaub beim Schwimmen, konnte ich leicht an der Oberfläche treiben
- Wenn ich jedoch ganz tief ausgeatmet habe, begann ich ganz langsam unterzutauchen
- **Warum sinke ich im Wasser, wenn ich ausatme?**



© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

7

6

Was ist die Dichte? – Erklärung

Dies ist das Grundprinzip! Unbedingt merken, lernen und verstehen!!!

- Die Masse alleine ist nicht ausreichend beschreibend, für die Eigenschaften eines Körpers
- Die Dichte ist der Quotient aus Masse (m) und Volumen (V) eines Körpers
- Abhängig von **Material, Temperatur und Druck (besonders bei Flüssigkeiten und Gasen)**

Andere häufig gebrauchte Einheiten:
 $1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 1 \frac{\text{Kg}}{\text{dm}^3} = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

$$\rho = \frac{m}{V} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{dm}^3} \right)$$

ρ =Dichte (kg/dm³)
 m = Masse (Kilogramm)
 V = Volumen (Kubikdezimeter)

Stoff	ρ (g/cm ³)
Luft (0°C, 101 kPa)	0,00129
Wasser (4°C)	1
Fettgewebe	≈ 0,9
Blut	≈ 1,05
Knochen	≈ 1,8
Körpergewebe (Mittelwert)	≈ 1,04
Gold (Au)	19,3
Quecksilber (Hg)	13,6

© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

8

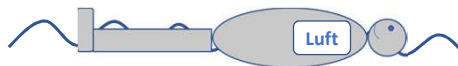
7

Physik im menschlichen Körper

- Der Standardmensch wiegt
- Das Volumen beträgt ca.

Volumen des menschlichen Körpers:

$$\rho = \frac{m}{V}$$



- Gesamtvolumen der Lunge:
- Masse der Luft in der Lunge:

Masse der Luft in der Lunge:

$$m = \rho * V$$

© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

9

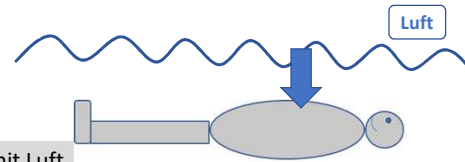
8

Wie verändert sich die Dichte während der Atmung?

- Ohne Luft in der Lunge:
 - Volumen des Körpers:
 - Dichte:
- Mit Luft in der Lunge:
 - Volumen des Körpers:
 - Dichte:

Dichte des Körpers mit Luft

$$\rho = \frac{m}{V}$$

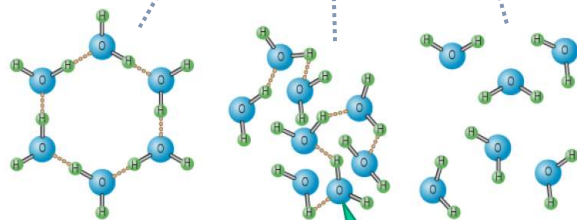
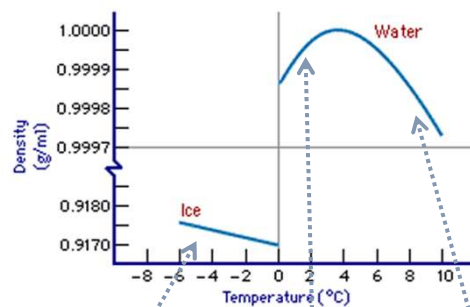


9

Dichteanomalie des Wassers

- Die Dichte des Wassers ist sehr stark vom jeweiligen Aggregatzustand abhängig!
- In der Regel nimmt die Dichte mit steigender Temperatur ab! **(besonders bei Gasen)**

Vorausgesetzt: Volumen und Druck bleiben konstant!!!



Danke an Dr. Tölgyesi für die Bereitstellung seiner Folien

10

Physik des menschlichen Körpers

- Wir bleiben beim Tauchen
- Ab einer gewissen Tiefe spürt man ein Drücken auf dem Trommelfell
- **Woher kommt dieser Druck auf dem Trommelfell?**

© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

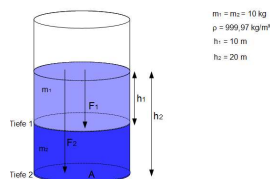
12

11

Was ist hydrostatischer Druck? – Erklärung

Dies ist das Grundprinzip! Unbedingt merken, lernen und verstehen!!!

- Durch die Gravitation werden die Teilchen einer Flüssigkeit nach unten gezogen => Schwerkraft:
 -
- Dadurch erzeugen sie eine Kraft auf die unter ihnen liegenden Teilchen
- Da diese Kraft auf die Fläche A wirkt ist sie ein Druck:



© Jan-Philipp Emmermann

$m_1 = m_2 = 10 \text{ kg}$
 $\rho = 999,97 \text{ kg/m}^3$
 $h_1 = 10 \text{ m}$
 $h_2 = 20 \text{ m}$

$$p = \rho * h * g (+p_{\text{barometrisch}})$$

p = Druck (Pascal)
 ρ = Dichte (kg/m^3)
 h = Höhe (Meter)
 g = Erdbeschleunigung (m/s^2)

Wichtig: bei inkompressiblen Flüssigkeiten nimmt der hydrostatische Druck linear zu!

Ganz korrekt muss man zu dem hydrostatischen Druck noch den atmosphärischen Druck, der auf die Flüssigkeit wirkt, addieren.

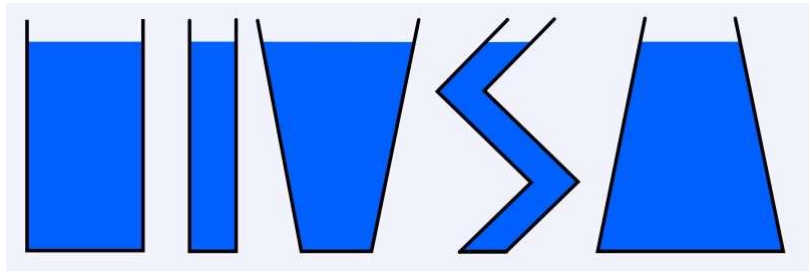
Wintersemester 2019

15

12

Hydrostatisches Paradoxon

- Der hydrostatische Druck ist nur von der Dichte der Flüssigkeit und der Höhe der Flüssigkeitssäule abhängig
- Irrelevant sind dabei Form des Gefäßes oder die tatsächliche Wassermasse



Wer es genauer wissen will, kann im Internet für Ingenieure relativ gute Erklärungen finden.

© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

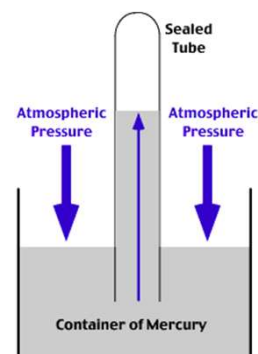
16

13

Pascalsches Gesetz

- Die Druckkraft wirkt an einer beliebigen Stelle in der Flüssigkeit in alle Richtungen gleichmäßig
- Dies liegt daran, dass die Flüssigkeit sich in alle Richtungen bewegen kann
- Dadurch funktionieren auch die Barometer nach Torricelli

Natürlich heißt das auch, dass man beim Tauchen immer den gleichen Druck auf dem Ohr hat, egal in welcher Richtung man ausgerichtet ist.
(Vorausgesetzt man ist immer auf exakt der gleichen Tiefe)



Hier kommt auch die Einheit Millimeter Quecksilbersäule her.

© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

17

14

Physik im menschlichen Körper

- Heute haben wir die Möglichkeit eine wirklich große Frage vieler Menschen zu klären:
- **Wofür braucht man diese Sauerstoffmasken im Flugzeug?**
- Zur Erklärung benötigt es mehrere Phänomene



© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

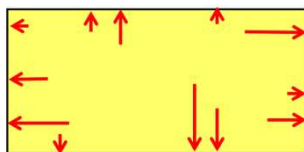
18

15

Was ist Gasdruck? – Erklärung

Dies ist das Grundprinzip! Unbedingt merken, lernen und verstehen!!!

- Gase üben auf die sie umgebenden Behälter einen Druck aus
- Dieser Druck entsteht durch die Bewegungen der Gasteilchen
- Durch die freien Bewegungen der Gasteilchen kommt es immer wieder zu elastischen Stößen untereinander und mit der Umgebung
- Die Summe aller Stöße bildet dadurch den Gasdruck



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

p = Druck (Pascal)
 V = Volumen (m^3)
 n = Stoffmenge (mol) (eigentlich: ν)
 R = univ. Gaskonstante ($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)
 T = Temperatur (Kelvin)

Wird später noch genauer erklärt! Fürs Erste nur das Verständnis wichtig.

© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

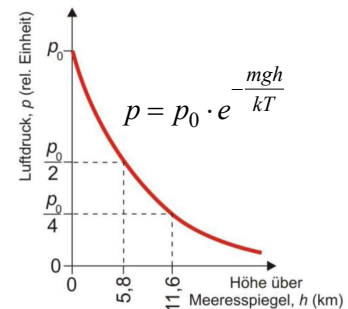
20

Danke an Dr. Tölgyesi für die Bereitstellung seiner Folien

16

Was ist Luftdruck? – Erklärung

- Die uns umgebenden Gase (Luft) üben ebenso einen Druck aus
- Die Umgebung der Gase sind dabei die Atmosphäre, Erde, Menschen, Bäume, etc.
- Der Luftdruck ist dabei der Druck, der an einem beliebigen Ort in der Atmosphäre durch die Gase in der Luft erzeugt wird
- Jedoch ist der Luftdruck nicht an allen Stellen gleich
- Mit zunehmender Höhe nimmt der Luftdruck ab



Dies leitet sich aus der Boltzmann-Verteilung ab!!! 21

© Jan-Philipp Emmermann

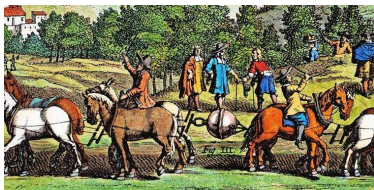
Wintersemester 2019

Danke an Dr. Tölgyesi für die Bereitstellung seiner Folien

17

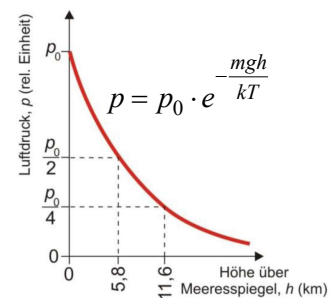
Was ist Luftdruck? – Zusätzliches

- Der Luftdruck wurde das erste mal durch Otto von Guericke mit den „Magdeburger Halbkugeln“ nachgewiesen
- Der Normdruck beträgt 101kPa (=1010 hPa = 1atm) und ist ein willkürlich gewählter Wert (=760mmHg)
- Der Luftdruck hat starken Einfluss auf das Wetter (Hoch- und Tiefdruckgebiete)



© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019



Dies leitet sich aus der Boltzmann-Verteilung ab!!! 22

Danke an Dr. Tölgyesi für die Bereitstellung seiner Folien

18

Was heißt das für die Atmung?

Das ist nur ein
Gedankenspiel!
Nicht merken!

- Der Mensch verbraucht in Ruhe ca. 250 ml reinen Sauerstoff pro Minute
- Setzt man dies in die universelle Gasgleichung ein bekommt man eine Stoffmenge von 0,0103mol
- Fliegt nun ein Flugzeug auf 5800 m ü. NN. herrscht ein Luftdruck von 50,66 kPa (entspricht ≈50%)(=380 mmHg)
- Setzt man diesen Druck in die univ. Gasgleichung ein, kann man errechnen, dass man für die gleiche Stoffmenge O₂ ein Volumen von 419 ml Sauerstoffgas benötigt

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

$$101\text{kPa} \cdot 0,00025\text{m}^3 = n \cdot 8,31 \cdot 295\text{K}$$

$$101000\text{Pa} \cdot 0,00025\text{m}^3 = n \cdot 8,31 \cdot 295\text{K}$$

$$n = \frac{101000\text{Pa} \cdot 0,00025\text{m}^3}{8,31 \cdot 295\text{K}} = 0,0103\text{mol}$$

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

$$50660\text{Pa} \cdot V = 0,0103\text{mol} \cdot 8,31 \cdot 248\text{K}$$

$$V = \frac{0,0103\text{mol} \cdot 8,31 \cdot 248\text{K}}{50660\text{Pa}}$$

$$V = 0,000419\text{m}^3 = 0,419\text{l}$$

© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

23

19

Was heißt das für die Atmung?

- Wenn man statt 250 ml, auf einmal 420 ml Luft für die gleiche Stoffmenge einatmen muss, ist das erstmal kein Problem
- Der Mensch hat in Ruhe ein Atemzeitvolumen von 6 l/min und dieses kann auf bis zu 180 l/min steigen
- Jedoch betrachtet diese Rechnung nicht den Gasaustausch in der Lunge und die tatsächliche Menge an Sauerstoff in der Luft

© Jan-Philipp Emmermann

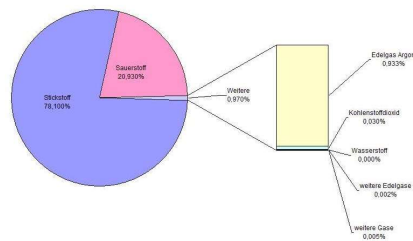
Wintersemester 2019

24

20

Was ist der Partialdruck?

- Die Luft besteht bekanntlich nicht nur aus Sauerstoff
- Die wichtigsten Bestandteile sind Stickstoff, Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und Edelgase



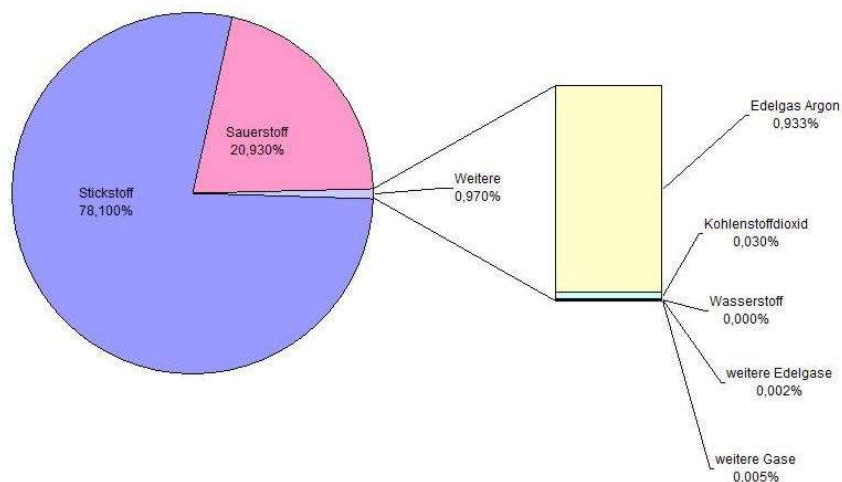
© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

25

21

Was ist der Partialdruck?



© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

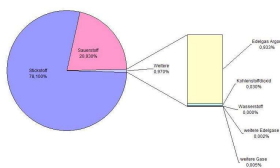
26

22

Was ist Partialdruck? – Erklärung

Dies ist das Grundprinzip! Unbedingt merken, lernen und verstehen!!!

- Der Partialdruck ist der Druck, den ein Gas in einem Gemisch, ausübt
- Die Summe aller Partialdrücke ergibt den Gesamtgasdruck (häufig als barometrischer Druck bezeichnet)
- Der Partialdruck eines Gases lässt sich mit der Fraktion (Anteil am Gasgemisch) und dem Gasdruck berechnen



$$p_{\text{Gas}} = F_{\text{Gas}} * p_{\text{barometrisch}}$$

p_{Gas} = Partialdruck des Gases (Pa)
 F_{Gas} = Fraktion des Gases (ohne Einheit)
 $p_{\text{barometrisch}}$ = Gesamtdruck des Gasgemisch (Pa)

Der Partialdruck von Sauerstoff beträgt auf Meerespiegel 21,2 kPa, bzw. 160mmHg.

© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

27

23

Wieso braucht man die Sauerstoffmasken?

Die Physiologen geben die Drücke meist in mmHg an. 1mmHg = 133Pa

- Auf einer Höhe von 5800 m beträgt der Sauerstoffpartialdruck nur noch 75 mmHg
- Durch die Befeuchtung der Atemluft und weiterer Druckverluste kommt davon in den Alveolen für den Gasaustausch ein Partialdruck von 34 mmHg an
- **Bei einem Sauerstoffpartialdruck von 34 mmHg überlebt man nur wenige Minuten**

$$\begin{aligned}
 p_{O_2} &= F_{O_2} * p_{\text{barometrisch}} \\
 p_{O_2} &= 0,21 * 380\text{mmHg} \\
 p_{O_2} &= 75\text{mmHg}
 \end{aligned}$$

© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

28

24

Wieso braucht man die Sauerstoffmasken?

- Aus den Sauerstoffmasken kommt jetzt reiner Sauerstoff, sodass der Partialdruck des Sauerstoff annähernd 100% des barometrischen Drucks erreicht.
- Wie groß müsste die Fraktion sein um den Sauerstoffpartialdruck auf Meereshöhe zu erreichen?
-

25

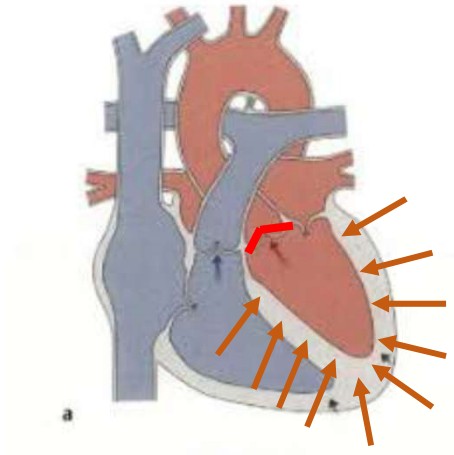
Wofür kann man jetzt das Ganze gebrauchen?

- Wirkung von Kräften auf den Körper bei Verletzungen
- Einfluss von der Dichte auf den Körper
- Verhalten von Drücken in Flüssigkeiten
- Einfluss von Luftdruck und Luftzusammensetzung auf die menschliche Atmung

26

Herz-Kreislauf-System

- Flüssigkeit in Leitungssystemen strömt nur, wenn ein Druckgradient besteht
- Diesen Druckgradienten erzeugt im Körper das Herz
- Das Herz kontrahiert und übt Druck (Stempeldruck) auf das Blut aus



©Prometheus, Innere Organe

© Jan-Philipp Emmermann

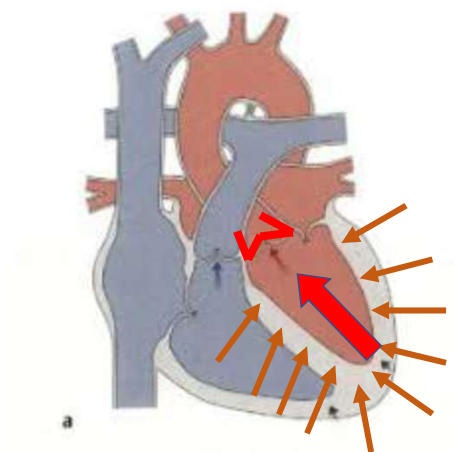
Wintersemester 2019

31

27

Herz-Kreislauf-System

- Der Druck in der Herzkammer wird größer als in der Aorta: Das Blut strömt aus dem Herzen in die Aorta



©Prometheus, Innere Organe

© Jan-Philipp Emmermann

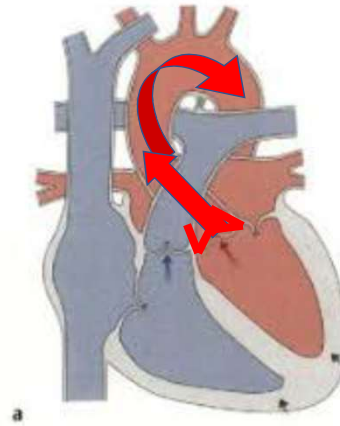
Wintersemester 2019

32

28

Herz-Kreislauf-System

- Das Herz erschlaft, sodass der Druck in der Aorta größer ist, als in dem Herzen
- Dadurch schließen die Herzklappen und das Blut kann nicht zurück strömen
- Die Windkesselfunktion erhält den Blutstrom aufrecht



©Prometheus, Innere Organe

© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

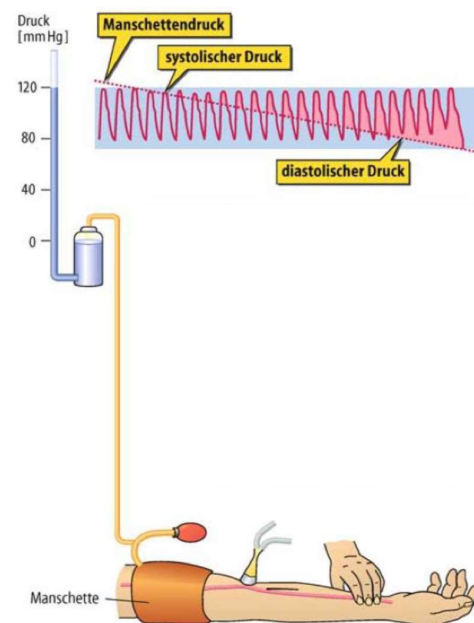
33

29

Blutdruckmessung

- Die Blutdruckmanschette wird aufgepumpt, bis in der Arterie kein Blut mehr fließt
- Nun wird der Druck langsam abgelassen
- Sobald der Druck in der Arterie minimal größer ist, als in der Manschette, fließt das Blut wieder durch die Arterie
- Die Pulswellen kann man dann tasten

So misst man den systolischen Druck, der direkt durch die Herzaktion erzeugt wird



Danke an Dr. Tölgyesi für die Bereitstellung seiner Folien

© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

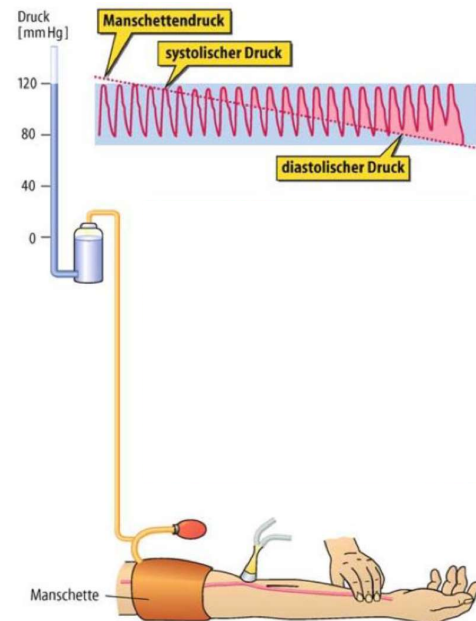
34

30

Blutdruckmessung

- Auf die Arterie wird ein Stethoskop gelegt
- Man hört ein rhythmisches Rauschen (Korotkow-Töne)
- Dieses Rauschen verschwindet, wenn die Arterie nahezu nicht mehr von der Manschette zusammengedrückt wird
- Dies ist dann der diastolische Blutdruck

Der diastolische Blutdruck entsteht durch die Windkesselfunktion der Aorta und sorgt für eine kontinuierliche Strömung des Blutes.



Danke an Dr. Tölgyesi für die Bereitstellung seiner Folien

© Jan-Philipp Emmermann

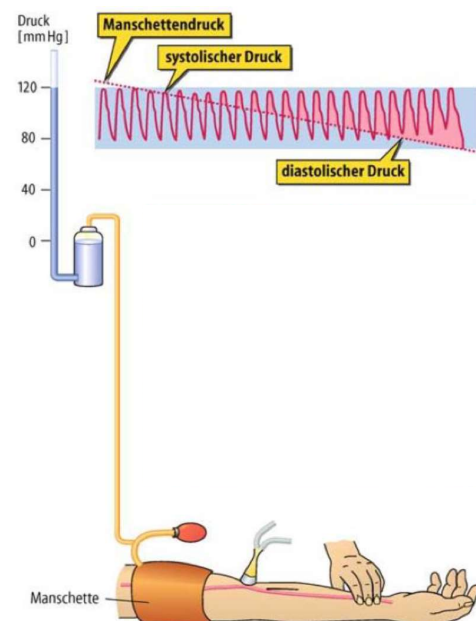
Wintersemester 2019

35

31

Blutdruckmessung

- Normwerte für den Blutdruck sind 130/80 mmHg (noch nicht merken)
- Der Luftdruck liegt jedoch bei 760 mmHg auf Meereshöhe
- Rein theoretisch müssten die Arterien vom Luftdruck alleine komprimiert werden
-



Danke an Dr. Tölgyesi für die Bereitstellung seiner Folien

© Jan-Philipp Emmermann

Wintersemester 2019

36

32