

Physik



Dipl.-Ing. Johannes Holzmannhofer
SALK – UK f. Nuklearmedizin und Endokrinologie

ANÄSTHESIE FORUM



ALPBACH

REPETITORIUM

Was ist drinnen



- Mathematik
- Einheiten
- Druck
- Luftfeuchtigkeit
- Gasgesetze
- Temperatur + -Messung
- Fluss
- ~~Lambert Beer'sches Gesetz~~
- ~~Optik: Laser~~
- QBase 1-6
- Cross/Plunkett: Physics, Pharmacology and Physiology for Anaesthetists; 2nd Ed.
- Hering: Physik f. Ingenieure; 10. Aufl.
- ...



- Zu viel Stoff
- Zu viele Fragen/Antworten
 - Leider auch „gemeines“
- Reihenfolge der Themen f. Vortrag „getauscht“

26.03.2023

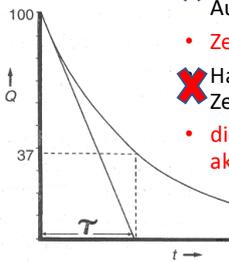
Physik in der Anästhesie

5

LEGENDE

LINKE Seite: Frage/Antwort

- Für Funktionen gilt:
 - Das Bolye'sche Gesetz wird grafisch durch **eine Parabel** beschrieben
 - Für eine Exponentialfunktion gilt:
 - durch **logarithmieren linear darstellbar**
 - Zeitkonstante: jene Zeit, die benötigt wird, um **um 36,8 %** gegenüber dem Ausgangswert zu fallen.
 - **Zeitkonstante: $1/k$**
 - **Halbwertszeit: das Dreifache der Zeitkonstante**
 - **die Änderungsrate ist proportional zum aktuellen Funktionswert**



26.03.2023

Physik in der Anästhesie

6

RECHTE Seite – korr. Antwort

- Das Bolye'sche Gesetz wird grafisch durch eine **Hyperbel** beschrieben
- Zeitkonstante: jene Zeit, die benötigt wird, um **auf 36,8 % (das $1/e$ -fache)** gegenüber dem Ausgangswert zu fallen.
- Halbwertszeit: **jene Zeit, um auf 50 % des Ausgangswertes zu fallen**

$$y_t = y_0 \cdot e^{-k \cdot t} = y_0 \cdot e^{-t/\tau} = y_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{T} \cdot t}$$



Mathematik

- **Mathematik**
- Einheiten
- Druck
- Luftfeuchtigkeit
- Gasgesetze
- Temperatur + -Messung
- Fluss

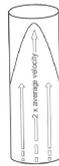
26.03.2023

Physik in der Anästhesie

7

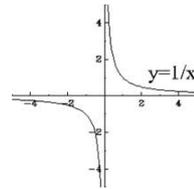
Kurvenformen

- Parabel $y=ax^2$



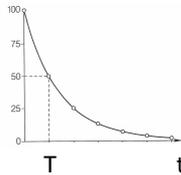
zB: laminar Flow

- Hyperbel $y = 1/x$

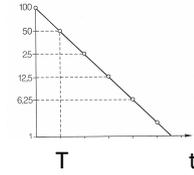


Boyle: $P = \frac{k}{V}$

- exp-Funktion



- log(exp-Funktion)



zB: Lambert-Beersches Gesetz

26.03.2023

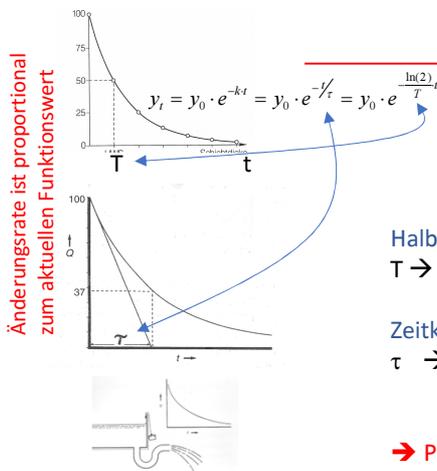
Physik in der Anästhesie

8

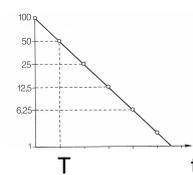
Exp-Funktion

- exp-Funktion: $e \cong 2,718$

- log(exp-Funktion)



Änderungsrate ist proportional zum aktuellen Funktionswert



zB: Lambert-Beersches Gesetz

Halbwertszeit

T → auf die Hälfte / um die Hälfte

Zeitkonstante

$\tau \rightarrow$ auf 37% (= 1/e)

„fertig“

5*T

3*\tau

→ Passiver Transfer

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = e^{-\frac{t=\tau}{\tau}} = e^{-1} = \frac{1}{e}$$

26.03.2023

Physik in der Anästhesie

9

Prozess 0-/1-er Ordnung

• Konzentrationsänderung

$$\frac{\Delta c}{\Delta t} = -k \cdot c \quad c = \frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}}$$

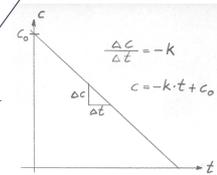
1: exp eingeschaltet || 0: exp ausgeschaltet

- **n = 0**: Geschwindigkeit der Reaktion ist unabhängig von der Konzentration c und konstant
 - Dauerinfusion
 - **konstante Menge**
- **n = 1**: Geschwindigkeit der Reaktion ist direkt proportional zur Konzentration c
 - Lichtabsorption, Diffusion
 - **konstanter Anteil**

$$\frac{\Delta c}{\Delta t} = -k \quad \text{oder} \quad \frac{\Delta c}{\Delta t} = -k \cdot c$$

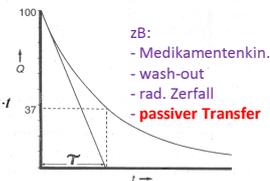
• Geradenglg.

$$c_t = c_0 - k \cdot t$$



• e-Funktion

$$c_t = c_0 \cdot e^{-k \cdot t}$$



26.03.2023

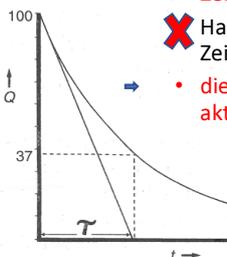
Physik in der Anästhesie

10

Antworten Math-1

• Für Funktionen gilt:

- **✗** Das Bolye'sche Gesetz wird grafisch durch eine **Parabel** beschrieben
 - Für eine Exponentialfunktion gilt:
 - durch **logarithmieren linear darstellbar**
 - Zeitkonstante: jene Zeit, die benötigt wird, um **um 36,8 %** gegenüber dem Ausgangswert zu fallen.
 - **Zeitkonstante τ : $1/k$**
 - **Halbwertszeit: das Dreifache der Zeitkonstante**
- **✗** Halbwertszeit: die Änderungsrate ist proportional zum aktuellen Funktionswert



- Das Bolye'sche Gesetz wird grafisch durch eine **Hyperbel** beschrieben

- Zeitkonstante: jene Zeit, die benötigt wird, um **auf 36,8 % (das 1/e-fache)** gegenüber dem Ausgangswert zu fallen.
- Halbwertszeit: jene Zeit, um **auf 50 % des Ausgangswertes** zu fallen

$$y_t = y_0 \cdot e^{-k \cdot t} = y_0 \cdot e^{-t/\tau} = y_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{T} \cdot t}$$

26.03.2023

Physik in der Anästhesie

11

Antworten Math-2

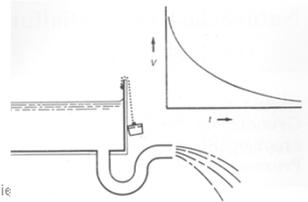
- Für die Konzentrationsänderung dc/dt gilt:
 - ✗ $dc/dt = -k \cdot c^1$ für einen Prozess 0. Ordnung
- ✗ $dc/dt = \text{konst.}$ für einen Prozess 1. Ordnung
- ✗ wenn die Konzentration c über die Zeit t grafisch dargestellt wird, erhält man eine Hyperbel
- ✗ durch Integration von dc/dt kann das Volumen bestimmt werden
- • ein passiver Transfer ist immer 1. Ordnung

$$\frac{\Delta c}{\Delta t} = -k \quad \text{oder} \quad \frac{\Delta c}{\Delta t} = -k \cdot c^1$$

- $dc/dt = -k \cdot c^1$ für einen Prozess 1. Ordnung
- $dc/dt = \text{konst.}$ für einen Prozess 0. Ordnung
- entweder e-Funktion oder Geradengleichung
- falsch (Fluss integrieren)

$$\frac{d}{dt} c \rightarrow \frac{dc}{dt}$$

$$\int \frac{dc}{dt} dt \rightarrow c$$



Einheiten

- Mathematik
- Einheiten
- Druck
- Luftfeuchtigkeit
- Gasgesetze
- Temperatur + -Messung
- Fluss

Fragen – Einheiten



- | | | |
|------------------|----------------|-----------------------|
| • l / L | ... Liter | • SI Basiseinheiten |
| • bar | ... Druck | • SI Einheiten |
| • Ω | ... Widerstand | • zulässige Einheiten |
| • mmHg | ... Druck | |
| • | ... Reynold Re | |
| • h | ... Zeit | |
| • s | ... Zeit | |
| • g | ... Masse | |
| • N | ... Kraft | |
| • Pa | ... Druck | |
| • atm | ... Druck | |
| • m ² | ... Fläche | |

SI-Einheiten



Basiseinheiten - SMMACKK

S	• s	... Sekunde	Zeit
M	• m	... Meter	Länge
M	• mol	... Mol	Stoffm.
A	• A	... Ampere	el. Strom
C	• cd	... Candela	Lichtst.
K	• kg	... Kilogramm	Masse
K	• K	... Kelvin	Temp.

Abgeleitete Einheiten

- Abgeleitete Einheiten:
 - m² Fläche
 - m/s m·s⁻¹ Geschwindigkeit
 - mol/m³ Konzentration
- ... mit besonderem Namen
 - N Kraft [kg·m·s⁻²]
 - Hz Frequenz [s⁻¹]
 - Pa Druck [N/m²]
 - °C Temperatur
 - J Energie, Arbeit, Wärmemenge
 - W Leistung, Energiestrom
 - ...

SI-fremde Einheiten ... zulässig



- uneingeschränkt
 - l / L ... Volumen [m³]
 - min ... Zeit [s]
 - h ... Zeit
 - bar ... Druck [Pa]
 - g ... Masse
 - t ... Masse
 - ...
- in Spezialgebieten [Medizin]
 - mmHg ... Blutdruck
Druck von Körperflüssigkeiten

- „dimensionslos“ – Dim. 1
 - pH-Wert
 - Reynold'sche Zahl
 - ...

SMMACKK-Definitionen



Einheit	Definition
s	Das X-fache der Periodendauer einer bestimmten Strahlung von Atomen des Cäsium-Isotops ¹³³ Cs. 
m	Länge der Strecke, die das Licht im Vakuum während der Dauer von 1/X Sekunde zurücklegt.
→ mol	Stoffmenge eines Systems, das aus ebenso viel Einzelteilchen besteht, wie Atome in 0,012 Kilogramm des Kohlenstoff-Isotops ¹² C enthalten sind. <ul style="list-style-type: none"> - Zahl der Teilchen der Stoffmenge 1 mol: Avogadro'sche Konst. $N_A = 6,022E23 \text{ mol}^{-1}$ - Ein Mol eines idealen Gases benötigt bei Std-T und Std-P das gleiche Volumen: 22,4 L
A	Stärke eines konstanten elektrischen Stromes, der, durch zwei parallele, im Vakuum im Abstand von 1 Meter voneinander angeordnete Leiter fließend, zwischen diesen Leitern pro Meter Leiterlänge die Kraft 2×10^{-7} Newton hervorrufen würde.
cd	Die Lichtstärke einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz X aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 Watt pro Steradian beträgt.
kg	Masse des Internationalen Kilogrammprototyps.
→ K	1/273,16 der Temperatur des Tripelpunkts von Wasser: 0,01 °C

Antworten – SI-1



• l / L	... Liter	
• bar	... Druck	
• Ω	... Widerstand	
• mmHg	... Druck	
•	... Reynold Re	
• h	... Zeit	
• s	... Zeit	S
• g	... Masse	M
• N	... Kraft	M
• Pa	... Druck	A
• atm	... Druck	C
• m ²	... Fläche	K

- **SI Basiseinheiten**
- **SI Einheiten**
- zulässige Einheiten

Antworten – SI-2



• l / L	... Liter	
• bar	... Druck	
• Ω	... Widerstand	
• mmHg	... Druck	
•	... Reynold Re	
• h	... Zeit	
• s	... Zeit	←
• g	... Masse	
• N	... Kraft	
• Pa	... Druck	
• atm	... Druck	
• m²	... Fläche	

- **SI Basiseinheiten**
- **SI Einheiten**
- zulässige Einheiten

Antworten – SI-3



- l / L ... Liter
- bar ... Druck
- Ω ... Widerstand
- mmHg ... Druck
- ... Reynold Re
- h ... Zeit
- s ... Zeit
- g ... Masse
- N ... Kraft
- Pa ... Druck
- atm ... Druck
- m^2 ... Fläche

- SI Basiseinheiten
- SI Einheiten
- zulässige Einheiten

Antworten – SI (mol)



- Betreffend der Einheit **mol** gilt folgendes:
 - Ist eine SI-Basiseinheit
 - ~~X~~ Ein mol einer beliebigen Flüssigkeit nimmt das gleiche Volumen ein
 - • Ein mol eines Diamanten besitzt eine Masse von ca. 12 g
 - • Ein mol Sauerstoff nimmt bei Standard-T und Standard-P ein Volumen von ca. 22,4 Liter ein.
 - ~~X~~ Ein mol enthält **Newton's** Anzahl von Teilchen.
- Korrekt:
 - nicht das gleiche Volumen → die gleiche Anzahl Partikel (ideales Gas?)
 - Erl: ... 0,012kg Kohlenstoff ...
 - Avogadro-Zahl $N_A = 6,022E23 \text{ mol}^{-1}$



Druck

- Mathematik
- Einheiten
- **Druck**
- Luftfeuchtigkeit
- Gasgesetze
- Temperatur + -Messung
- Fluss

Wichtige phys. Größen

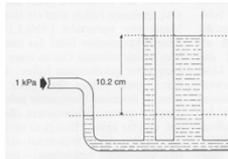
Größe	Definition	Einheit	Formel
Kraft	Etwas, das den Zustand der Ruhe oder der Bewegung eines Objektes ändert oder zu ändern versucht.	Newton N	$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$
Druck	Kraft, die auf eine Oberfläche wirkt.	Pascal Pa	$p = \frac{ \vec{F}_\perp }{ \vec{A} }$
Arbeit (mech.)	Wirken einer Kraft längs eines Weges.	Joule J	$W = \vec{F} \cdot \vec{s}$
Energie	Fähigkeit zur Verrichtung von Arbeit. [Energie: thermische, potentielle, kinetische, elektrische, ...]	Joule J	
Leistung	Energie pro Zeit. Arbeit pro Zeit.	Watt W	$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\Delta W}{\Delta t}$

Holzwege

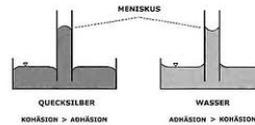
Druck in Flüssigkeiten

Grundlegendes

- *Ursache:* Gravitationskraft auf Moleküle der Flüssigkeit
- → Querschnitt der Flüssigkeitssäule bedeutungslos



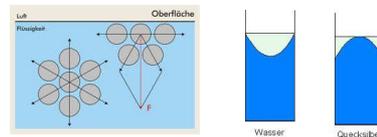
- Wasserdruck
 - 1 kPa = 10,2 cmH₂O
 - 100 kPa ≅ 1000 cmH₂O = 1 bar



Kohäsion → Tropfenbildung
 Adhäsion → Grenzfläche

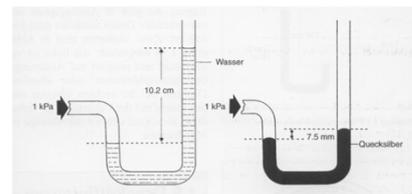
Oberflächenspannung

- Tropfenbildung
- Druckablesung in engen Kapillaren durch Oberflächenspannung verfälscht



Druck: Umrechnung von Einheiten

- 1 Pa = 1 N/m²
- 100 kPa = 1 bar
- 1 kPa = 7,5 mmHg
- 1 kPa = 10,2 cmH₂O



- | | | |
|-------------------|---------------------------|----------|
| • 100 kPa = 1 bar | = 750 mmHg | |
| • 100 kPa = 1 bar | = 1020 cmH ₂ O | [1000] |
| • 100 kPa = 1 bar | = 1 ATA | |
| • 100 kPa = 1 bar | = 14,7 psi | |

Antworten – Druck

→ • **Definition** Druck

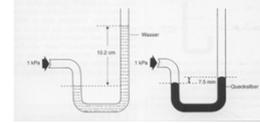
X Kraft * Fläche

• Kraft / Fläche $P = \frac{|F|}{|A|}$

X Arbeit / Zeit

• **Einheit**

X Newton
• Pascal



• **Umrechnung**

• mmHg vs cmH₂O

• 7,5 mmHg = 10,2 cmH₂O

• kPa vs mmHg

• 1 kPa = 7,5 mmHg

• kPa vs bar

• 100 kPa = 1 bar

• 1 bar =

X 100 mmHg 750 mmHg

X 10 kPa 100 kPa

X 100 cmH₂O 1000 cmH₂O

X 14,7 psi

• 2 ATA 1 ATA

X

Druck - Beispiel

$$P = \frac{|F|}{|A|}$$

Druck in 2-ml-Spritze

• Daumendruck F=25 N

• Spritze

• D = 8 mm = 0,008 m

• A = 5·10⁻⁵ m²

• P = 500 kPa

Druck in 20-ml-Spritze

• Daumendruck F=25 N

• Spritze

• D = 18 mm = 0,018 m

• A = 25·10⁻⁵ m² *5

• P = 100 kPa /5

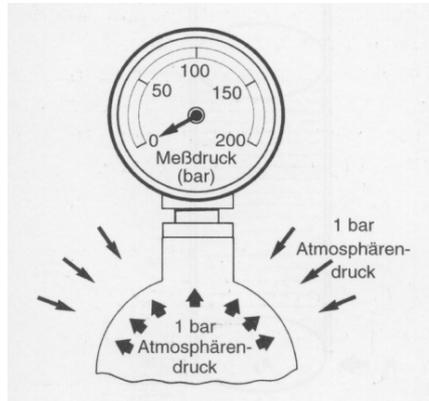
Syst. Blutdruck = 16 kPa = 120 mmHg

Druckmanschette: Pat. vor systemischer Wirkung des in distale Vene injizierten Lokalanästh. schützen.

Absoluter Druck vs Messdruck

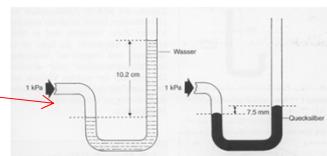
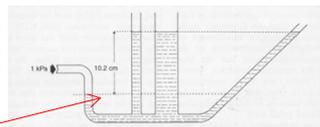
Messdruck und absoluter Druck

- **Was ist eine „leere“ Gasfl.?**
- Absoluter Druck = Messdruck + atmosphärischer Druck
 - Sauerstoffflasche: Meßdruck
 - 137 bar voll
 - 0 bar „leer“

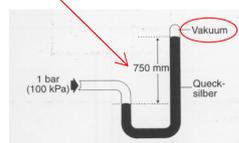
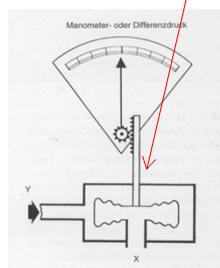


Druckmessung

- Neigung
- Dichte: H_2O vs Quecksilber
- Absolut: Quecksilber
- Differenzdruck



Dichte:
 $Hg \sim 13,6 * H_2O$





Luftfeuchtigkeit

- Mathematik
- Einheiten
- Druck
- **Luftfeuchtigkeit**
- Gasgesetze
- Temperatur + -Messung
- Fluss

Luft: Gasgemisch

N_2 , O_2 , Ar, ... H_2O , ...

78 %, 21 %, 1 %

26.03.2023

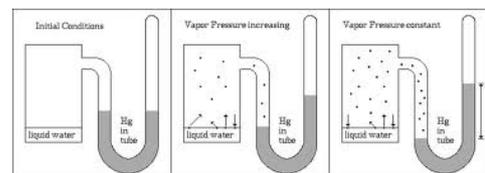
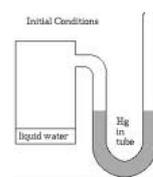
Physik in der Anästhesie

30

Gleichgewicht: flüssige / gasförmige Phase

Sättigungsdampfdruck (SVP)

- Gefäß mit Flüssigkeit, Gasraum evakuiert
 - Dampfdruck steigt → Gleichgewicht zwischen Verdampfungs-/Kondensationsrate
Wasser ↔ Wasserdampf
 - unabhängig vom Volumen
 - steigt mit zunehmendem T
 - [unabhängig von P]
- Verdampfung in *offener* Umgebung:
„Verdunstung“
 - kein Phasengleichgewicht



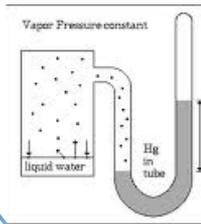
[Chemie: Dampfdruck @ T]

26.03.2023

Physik in der Anästhesie

31

Luftfeuchtigkeit



Theorie

• Sättigungsdampfdruck SVP

- Druck der dampfförmigen Phase eines Stoffes, wenn die flüssigförmigen und dampfförmigen Phasen sich im Gleichgewicht befinden.
 - Verdampfungsrate
 - Kondensationsrate
- Bei Reinstoff lediglich von T abhängig!
- Unabhängig von V, P

• Partialdruck

- Druck, den die einzelne Gaskomponente bei **alleinigem Vorhandensein** im betreffenden Volumen ausüben würde.

• Daltonsches Gesetz der Partialdrücke

- Druck der „feuchten Luft“ = Druck der trockenen Luft + Druck des Wasserdampfes

$$p_{ges} = \sum_{i=1}^n p_i$$

• Absolute Luftfeuchtigkeit

- Masse Wasserdampf / Volumen der Luft

$$\varphi_a = \frac{m_D}{V_{fl}}$$

• Relative Luftfeuchtigkeit

- Partialdruck Wasserdampf / SVP des Wasserdampfes (bei T)
- Abs. LF / Masse Wasserdampf bei gesättigter Luft (bei T)

$$\varphi = \frac{p_D}{p_s}$$

26.03.2023

Physik in der Anästhesie

32

Antworten – Luftfeuchtigkeit

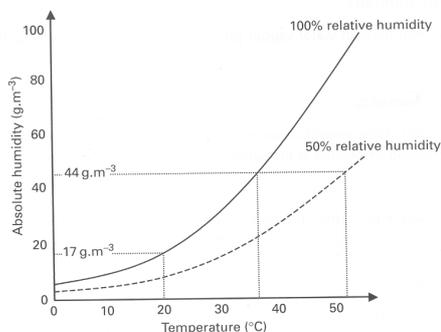
→ **X** Absolute Luftfeuchtigkeit = Wasserdampfvolumen in Luftvolumen (@ P, T)

→ • Relative Luftfeuchtigkeit = Wasserdampf-Partialdruck / SVP (@ T)

→ **X** Druck der feuchten Luft entspricht Partialdruck des Wasserdampfes

• Absolute Luftfeuchtigkeit = Masse in Luftvolumen (@ P, T)

• Druck der feuchten Luft = Partialdruck des Wasserdampfes + Druck der trockenen Luft



26.03.2023

Physik in der Anästhesie

33



Gasgesetze

- Mathematik
- Einheiten
- Druck
- Luftfeuchtigkeit
- **Gasgesetze**
- Temperatur + -Messung
- Fluss

Ideales Gas (IMMER Gas)

- **Eigenschaften**
 - Teilchen sind verschwindend klein
 - Außer der Stoß-Wechselwirkung keine WW (Kräfte) zwischen den Teilchen
- **Satz von Avogadro (mol)**
 - Gleiche Volumina idealer Gase enthalten bei gleichem Druck und gleicher Temperatur gleich viele Moleküle
- **Temperatur (Temperature)**
 - Maß für die mittlere kinetische Energie der Gasmoleküle
- **Wärme (Heat)**
 - Energie, die aufgrund eines T-Unterschiedes zwischen zwei Systemen übertragen wird

- Universales Gasgesetz = Zustandsgleichung
pf-nerd

$$PV = nRT$$

- Gesetz von Boyle-Mariotte

$$P \cdot V \propto k$$

T = konst. → Water ,boyles' at same T

- Charles' Gasgesetz

$$V \propto k \cdot T$$

P = konst. → Prinz Charles is under constant Pressure ...

- Gesetz von Gay-Lussac

$$P \propto k \cdot T$$

V = konst.

F + A – Boyle'sches Gesetz

Fragen $P \cdot V \propto k$

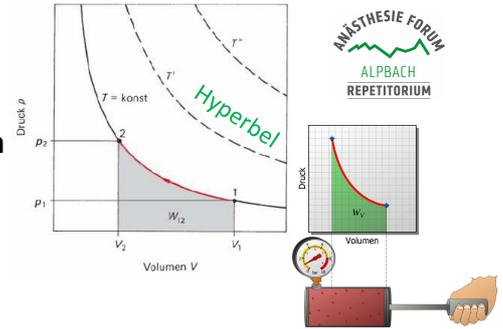
- • T = konst.; P prop. zu Dichte
- T = konst.; P inv.prop. zu V
- • T = konst. + gleichbleibende Gasmenge:
Produkt von P und V ist konstant

✗ P = konst.; V prop. zu T
 $V \propto k \cdot T$

✗ V = konst.; P prop. zu T
 $P \propto k \cdot T$

Antworten

$$P \propto \frac{k}{V} \propto m \cdot \frac{k}{V} \propto k \cdot \rho$$



ANÄSTHESIE FORUM
ALPBACH
REPETITORIUM

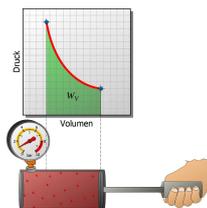
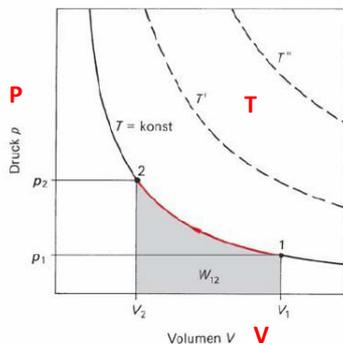
- P = konst. → nicht Boyle (Charles);
V prop. zu T → grundsätzlich korrekt
- V = konst. → nicht Boyle (Gay-Lussac);
P prop. zu T → grundsätzlich korrekt

p, V-Zustandsdiagramm

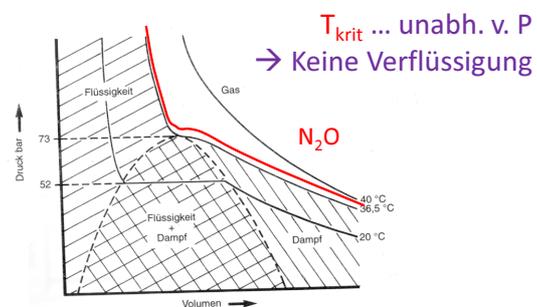
Ideales Gas (IMMER Gas)

- Boyle: $P \cdot V = \text{konst.}$
- Hyperbel

$$PV = nRT$$



Reales Gas: Lachgas



Dampf: Subst. in Gasphase $\leq T_k$

ANÄSTHESIE FORUM
ALPBACH
REPETITORIUM

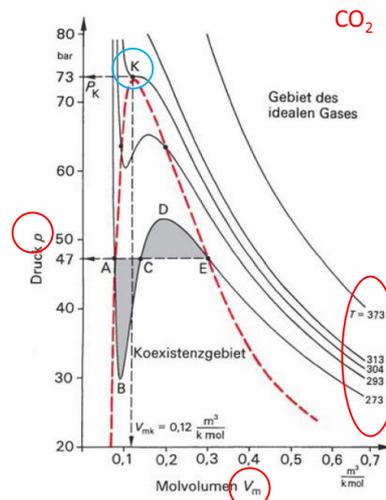
Reale Gase → Van-der-Waal'sche Zustandsgleichung

Reale Gase

$$PV = nRT$$

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = R_m T$$

- Kohäsion (Anziehungskraft) zwischen den Gasmolekülen
- Eigenvolumen (Kovolumen) der Gase
- Van-der-Waal'sche Zustandsgleichung
 - a, b ... Materialkonst.
 - grafisch: **pV-Diagramm**
 - Kritischer Punkt
 - Oberhalb: Verflüssigung durch alleinige Komprimierung nicht möglich
 - krit. T / p / V
 - O: $T_{krit} = -116^\circ\text{C}$
 - NO: $T_{krit} = -93^\circ\text{C}$
 - CO₂: $T_{krit} = 31^\circ\text{C} \dots 304\text{ K}$
 - N₂O: $T_{krit} = 36,5^\circ\text{C}$ (Lachgas)

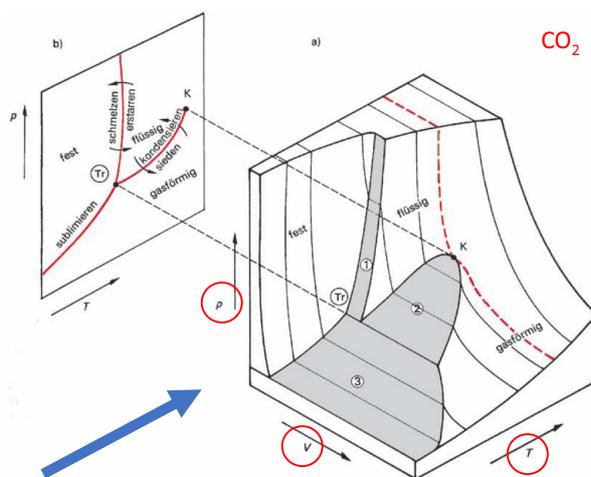


26.03.2023

Physik in der Anästhesie

38

Zustandsdiagramm



$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = R_m T$$

Zustand:

- fest
- flüssig
- gasförmig

→ Phasenübergänge

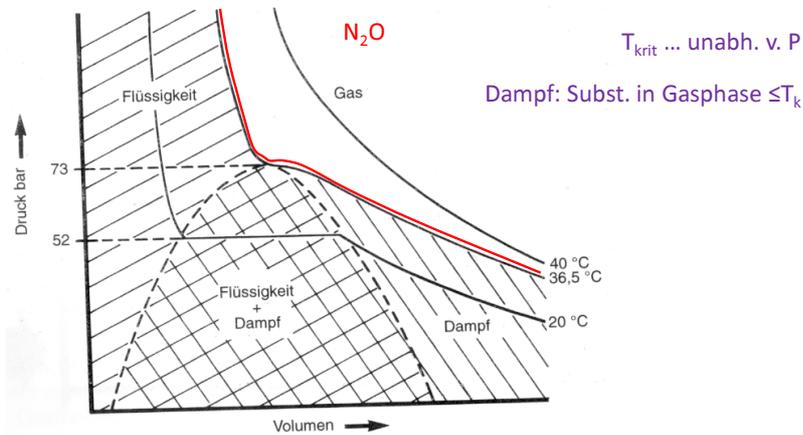
Abb. 3.47 Zustandsdiagramm. a) Dreidimensionales p, V, T-Diagramm (schematisch), b) zweidimensionales p, T-Diagramm (schematisch). p Druck, V Volumen, T absolute Temperatur, Tp Tripelpunkt, K kritischer Punkt, 1, 2, 3 Gleichgewichtsgebiete

26.03.2023

Physik in der Anästhesie

39

p,V-Zustandsdiagramm Lachgas



26.03.2023

Physik in der Anästhesie

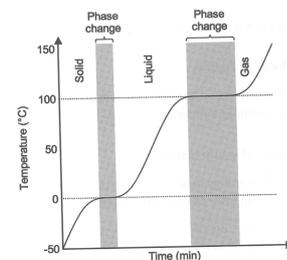
40

Phasenumwandlungen

Phase

- Räumlich abgegrenztes Gebiet eines Stoffes mit gleichen physikalischen Eigenschaften.
- Aggregatzustände: fest, flüssig, gasförmig
- Phasenübergang
 - Wärmezufuhr/-abfuhr ohne Temperaturänderung \rightarrow latente Wärme

nach \ von	fest	flüssig	gasförmig
fest	Modifikationsänderung (Modifikationsenthalpie ΔH_M)	Schmelzen (Schmelzenthalpie ΔH_S)	Sublimieren (Sublimationsenthalpie $\Delta H_{\text{Sub}} = \Delta H_S + \Delta H_V$)
flüssig	Erstarren (Erstarrensenthalpie $-\Delta H_S$)	—	Sieden (Verdampfungsenthalpie ΔH_V)
gasförmig	Desublimieren (Desublimationsenthalpie $-\Delta H_{\text{Sub}} = -\Delta H_S - \Delta H_V$)	Kondensieren (Kondensationsenthalpie $-\Delta H_V$)	—

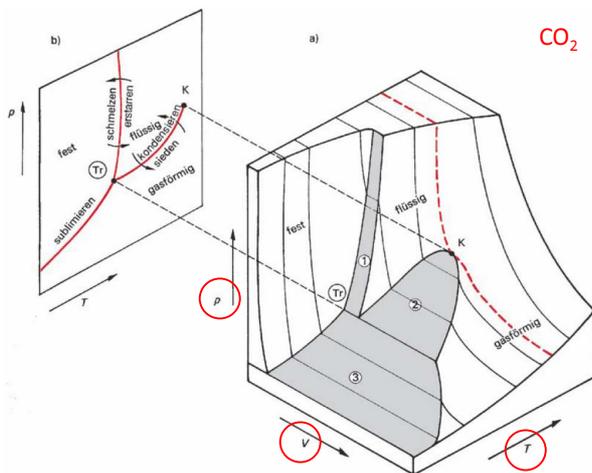


26.03.2023

Physik in der Anästhesie

41

Zustandsdiagramm



$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = R_m T$$

Zustand:

- fest
- flüssig
- gasförmig

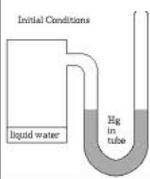
→ Phasenübergänge

Abb. 3.47 Zustandsdiagramm. a) Dreidimensionales p, V, T-Diagramm (schematisch), b) zweidimensionales p, T-Diagramm (schematisch). p Druck, V Volumen, T absolute Temperatur, Tr Tripelpunkt, K kritischer Punkt, 1, 2, 3 Gleichgewichtsgebiete

Gleichgewicht: flüssige / gasförmige Phase

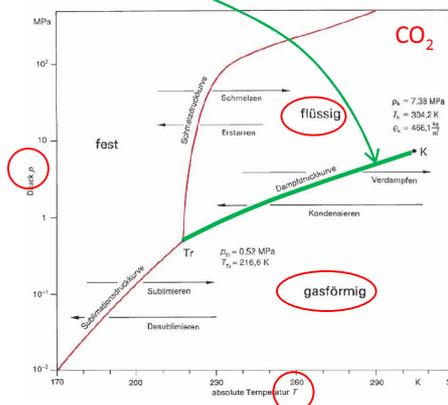
Sättigungsdampfdruck (SVP)

- sichtbar im p,T-Zustandsdiagramm
- Gefäß mit Flüssigkeit, Gasraum evakuiert
 - Dampfdruck steigt → Gleichgewicht zwischen Verdampfungs-/Kondensationsrate
 - unabhängig vom Volumen
 - steigt mit zunehmendem T
 - *unabhängig von P*
- Verdampfung in *offener* Umgebung: Verdunstung
 - kein Phasengleichgewicht
- Siedepunkt SP
 - Dampfdruck der Flüssigkeit = Druck eines (*anderen*) Gases auf Flüssigkeit → Dampfblasen auch im Inneren der Flüssigkeit
 - Druck des Gases erhöhen → SP steigt
 - Druck des Gases erniedrigen → SP sinkt
 - Bsp: Wasser → SVP = Umgebungs*luft*druck



Phasen-/Zustandsdiagramm

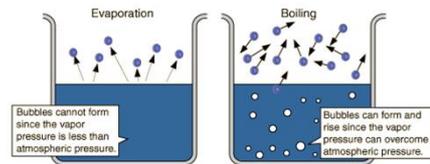
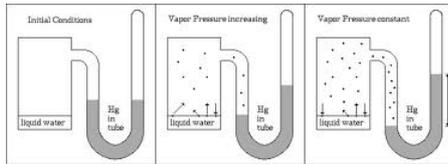
- Verlauf der Phasengrenzen zwischen Aggregatzuständen in Abhängigkeit von p, T (V)



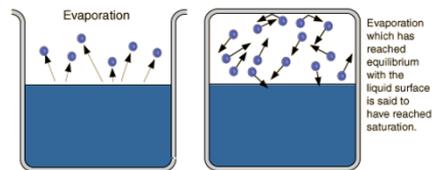
Bilder SVP und Siedepunkt

Sättigungsdampfdruck = $f(T)$

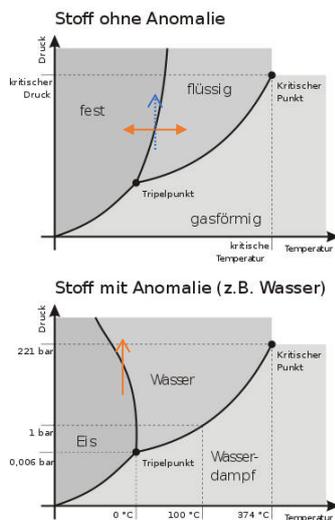
Siedepunkt



[Chemie: Dampfdruck @ T]



pT-Zustandsdiagramm



Löslichkeit

Konzentration *in* Flüssigkeit
 \propto (Proportional!)
 Partialdruck des Gases *über* der Flüssigkeit

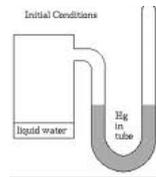


Henry-Gesetz

- Beschreibt: Löslichkeit von flüchtigen Substanzen in Flüssigkeit
- **Begriff: Partialdruck** (Gemisch aus idealen Gasen)
 - Druck, den die einzelnen Gaskomponente bei alleinigem Vorhandensein im betreffenden Volumen ausüben würde.
- Bei einer bestimmten **Temperatur** ist die Menge eines **in** einer bestimmten **Flüssigkeit** gelösten Gases **direkt proportional zum Partialdruck des Gases**, das sich im Gleichgewicht mit der Flüssigkeit befindet.

Tauchen - Dekompressionserkrankung

- Umgebungsdruck: Zunahme um ca. 1 bar / 10 m
- Atemluft wird parallel zum steigenden Wasserdruck mit steigendem Druck zugeführt
- Stickstoff löst sich mit steigendem Partialdruck „besser“ (Henry-Gesetz) im Blut
- Zu schnelles auftauchen:
 - Löslichkeit für Stickstoff nimmt im Blut gemäß Henry rapide ab \rightarrow Stickstoff gas aus
 - Gasbläschen behindern Blutströmung



26.03.2023

Physik in der Anästhesie

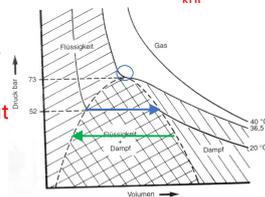
46

Antworten – Gasgesetze-1



• Kritische Temperatur

- \rightarrow ~~X~~ T, bei der Stoff bei Umgebungsdruck gleichzeitig flüssig und gasförmig ist
- \rightarrow ~~X~~ T_{krit} hängt von Druck ab
- \rightarrow • Unterhalb T_{krit} gilt: je geringer T, desto weniger Druck ist für die **Verflüssigung** erforderlich
- \rightarrow • Bei T_{krit} gilt: für die **Verdampfung der Flüssigkeit** wird keine zusätzliche Energie benötigt
 Phasenübergang / latente Wärme!
- \rightarrow ~~X~~ Sauerstoff kann bei Raumtemperatur mit P = 50 bar verflüssigt werden
- ~~X~~ für N_2O (Lachgas) gilt: $T_{krit} = -116^\circ C$



- solange $T < T_{krit}$ \rightarrow Gas kann durch Druck verflüssigt werden!
- T_{krit} für versch. Gase unterschiedlich (**Eigenschaft!!**)
- Sauerstoff: $T_{krit} = -116^\circ C$ \rightarrow keine Verflüssigung bei Raumtemperatur!
- für N_2O gilt: $T_{krit} = 36,5^\circ C$

26.03.2023

Physik in der Anästhesie

47

Antworten – Gasgesetze-2

- Verdampfen von Flüssigkeiten

- • SVP (Sättigungsdampfdruck) nimmt mit T zu
- • Siedepunkt wird bei jenem T erreicht, bei dem SVP = Umgebungsdruck
- **X** SVP nimmt mit zunehmender Höhe ab
- **X** SVP ist der Druck bei der kritischen Temperatur
- **X** SVP nimmt mit Druck zu
- **X** SVP gleich Umgebungsdruck bei Siedepunkt
- X** SVP kann größer als der Siedepunkt sein

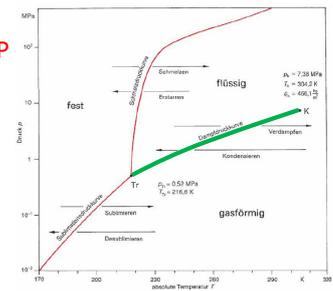
Siedepunkt:

- T bei Ph.-Ü. von fl. → gasf.
- SVP = Umgebungsdruck

SVP:

- fl. und dampff. Phase im GI Gew.
- H₂O: SVP bei 20°C, 80°C, 100°C
- SVP f. 101°C definiert (keine Flüssigkeit!!)?

- SVP ist unabhängig von P, nimmt mit steigender T zu
- SVP ist der Druck, wenn fl. und dampff. Phase im Gleichgewicht
- SVP unabhängig von P
- sinnlose Aussage



Temperatur + Messung

- Mathematik
- Einheiten
- Druck
- Luftfeuchtigkeit
- Gasgesetze
- **Temperatur + -Messung**
- Fluss

Temperatur: Theorie



Theorie

- 1 Kelvin: $1/273,16$ der Temperatur des Tripelpunkts von Wasser ($0,01\text{ °C}$)

Praxis

- Je kleiner die Messsonde, desto kürzer die Messzeit



26.03.2023

Physik in der Anästhesie

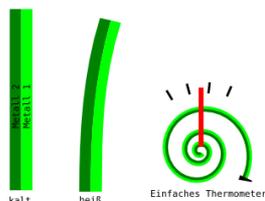
50

Messmöglichkeiten f. T (1)



Ausdehnungskoeffizient

- Gas-/Flüssigkeitsthermometer
 - Quecksilber: -30 °C bis $+350\text{ °C}$
- Bimetallthermometer
 - aktiv: Fe, Ni, Mn, Cr
 - passiv: Eisen-Nickel-Legierung



26.03.2023

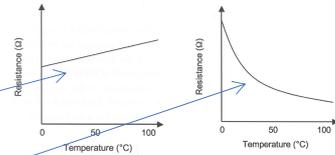
Physik in der Anästhesie

51

Messmöglichkeiten f. T (2)

elektrische Größen

Messung



• elektrischer Widerstand $R = f(T)$

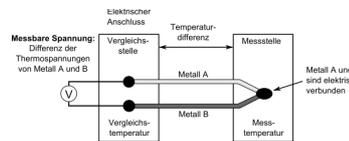
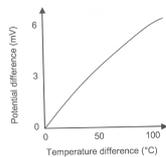
- **Leiter: Edelmetal** (meist **Platin**)
 - positiver T-Koeff: $RQkT$
 - kaum Alterung, hohe Genauigkeit
- **Halbleiter: Thermistoren**
 - negativer T-Koeff: $RQ-kT$
 - empfindlich, geringere Präzision

• Messschaltung: $U = I \cdot R$

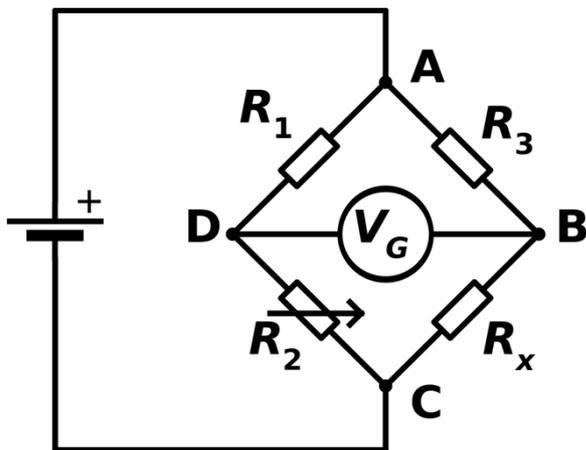
- Verwende konstanten Strom I
 - Ändert sich R \rightarrow ändert sich U
- **Wheatstone-Brücke:**
 - differenzbildende Schaltung, welche Änderung der Spannung gegenüber Anfangswert misst
 - $R = f(T)$

• **Seebeck-Effekt** (thermoelektrischer Effekt): In Stromkreis aus **zwei verschiedenen Leitern** entsteht durch ΔT an Kontaktstelle eine elektrische Spannung

• Thermoelemente (Seebeck)



Wheatstone-Brücke



Antworten – Temperatur



- ✘ Tripelpunkt von Wasser liegt ca. bei -273°C
- ✘ Thermistor: besteht aus zwei unterschiedlichen Leitern
- ✘ Thermistor (Halbleiter): basierend auf Seebeck-Effekt
 - Elektrischer Widerstand eines Leiters wächst mit zunehmendem T
- ✘ Elektrischer Widerstand von Platin nimmt mit zunehmendem T ab
 - Je kleiner ein Messelement zur Temperaturmessung, desto kürzer die Antwortzeit
 - Elektrischer Widerstand eines Thermistors nimmt mit zunehmender Temperatur ab
 - Quecksilber-Thermometer für -30°C bis $>200^{\circ}\text{C}$ geeignet
- • Widerstands-Thermometer wird in Wheatstone-Brückenschaltung betrieben
- ✘ Die Thermistor-Kalibrierung wird durch Hitze-Sterilisierung nicht verändert
- Tripelpunkt von Wasser liegt ca. bei $0,01^{\circ}\text{C}$
- Thermistor: besteht aus Halbleiter
- Seebeck-Effekt = Leiter!! → Thermoelemente
- Elektrischer Widerstand von Platin nimmt mit zunehmendem T zu (pos. T-Koeff.)
- Erl.: → neg. T-Koeff.
- Die Thermistor-Kalibrierung wird durch größere T-Änderungen beeinflusst

26.03.2023

Physik in der Anästhesie

54



Fluss

- Mathematik
- Einheiten
- Druck
- Luftfeuchtigkeit
- Gasgesetze
- Temperatur + -Messung
- Fluss



26.03.2023

Physik in der Anästhesie

55

Definitionen

Fluss

- Menge (Masse oder Volumen) pro Zeiteinheit

$$F = \frac{Q}{t}$$

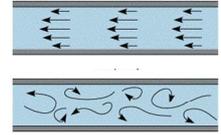


Viskosität η [eta]

- Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluids (Gas, Flüssigkeit)
 - Gas: Viskosität prop. T
 - Flüssigkeit: Viskosität indir. prop. T

Reynoldssche Zahl

- $R < 1.000$ laminar
- $R > 2.000$ turbulent



$$R = \frac{\rho v d}{\eta}$$

- v ... Geschwindigkeit
- ρ ... Dichte
- d ... Durchmesser
- η ... Viskosität

$$R = \rho v \eta d = \text{rund}$$

Laminar vs. turbulent

Laminarer Fluss

- Hagen-Poiseuille-Gl.

$$F = \frac{\pi p r^4}{8 \eta l} \propto p \propto r^4 \propto \frac{1}{l} \propto \frac{1}{\eta}$$

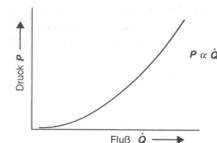
- p ... Druckdifferenz
- r ... Radius
- η ... Viskosität
- l ... Rohrlänge



Turbulenter Strömung

$$F \propto \sqrt{p} \propto \frac{1}{\sqrt{l}} \propto \frac{1}{\sqrt{\rho}} \quad \dots \text{Wurzel}$$

- ρ ... Dichte [kg m^{-3}]
- Unterschied
 - OfI: rauh / glatt



Hagen-Poiseuille-Glg. i.d. Praxis

$$F = \frac{\pi p r^4}{8 \eta l} \propto p \propto r^4 \propto \frac{1}{l} \propto \frac{1}{\eta}$$

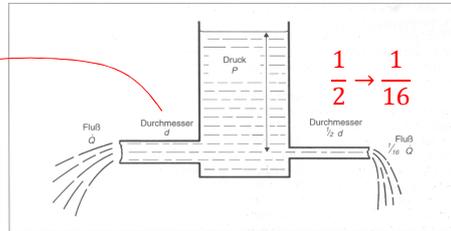


Abbildung 2.4: Einfluß einer Halbierung des Röhrendurchmessers auf den Fluß.

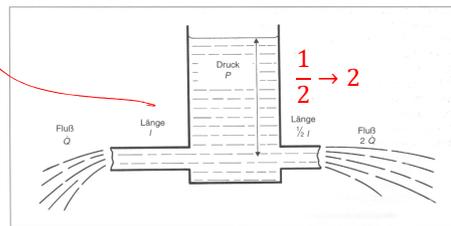


Abbildung 2.5: Einfluß der Halbierung einer Röhre auf den Fluß.

26.03.2023

Physik in der Anästhesie

58

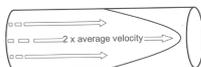
Antworten – Fluss-1: laminar

Laminar

- ~~✗~~ Radius halbieren → Reduktion des Flusses um Faktor 8
- ~~✗~~ Fluss indirekt prop. zu r^4
- ~~✗~~ Fluss direkt prop. zu r^2
- ~~✗~~ Fluss indirekt prop. zu Dichte
- ~~✗~~ Fluss direkt prop. zu Dichte
 - Fluss indirekt prop. zu Viskosität
 - Fluss indirekt prop. zu Rohrlänge
 - Fluss direkt prop. zu Druck-Differenz
- Geschwindigkeit des Flusses unmittelbar an der Rohrwand ist beinahe 0
- Geschwindigkeit in der Mitte ca. 2x der mittleren Geschwindigkeit
- Radius halbieren → Reduktion des Flusses um Faktor 16
- Fluss direkt prop. zu r^4
- Fluss direkt prop. zu $r^2 \rightarrow r^4$
- falsch
- falsch

Dichte spielt eine Rolle: $R=f(p)$
Laminar oder turbulent?!

$$F = \frac{\pi p r^4}{8 \eta l} \propto p \propto r^4 \propto \frac{1}{l} \propto \frac{1}{\eta}$$



26.03.2023

Physik in der Anästhesie

59

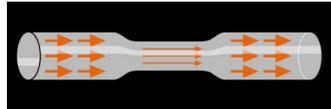
Antworten – Fluss-2: turbulent

Turbulent

- **X** Viskosität eine wesentliche Größe für turbulenten Fluss
 - $Re > 2000$: Wahrscheinlichkeit für turbulenten Fluss ist groß
 - X** $Re > 2500$: laminarer Fluss
 - Re direkt prop. zu Dichte
 - **X** Re direkt prop. zu Viskosität
 - Kritische Geschwindigkeit: Kennzeichnet den Übergang von laminarem zu turbulentem Fluss
 - Viskosität einer Flüssigkeit nimmt mit steigender Temperatur ab
 - Viskosität eines Gases nimmt mit steigender Temperatur zu
- falsch $F \propto \sqrt{p} \propto \frac{1}{\sqrt{l}} \propto \frac{1}{\sqrt{\rho}}$
 - $Re > 2500$: turbulenter Fluss
 - Re indirekt direkt prop. zu Viskosität

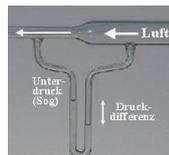
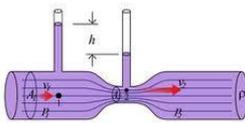
$$R = \frac{\rho v d}{\eta}$$

Energieerhaltung



Bernoulli-Prinzip

- Beziehung zwischen Fließgeschwindigkeit eines Fluides (Gas, Flüssigkeit) und dessen Druck:
 - Geschwindigkeitsanstieg wird von Druckabfall begleitet!
 - Druck ist in der Engstelle am Geringsten (ggf. Unterdruck)



Venturi-Effekt

- Fluss ist in der Engstelle am Größten
 - dyn. Druck = maximal
 - stat. Druck = minimal
 - Differenzdruck kann zum Ansaugen von Flüssigkeiten/Gasen benutzt werden

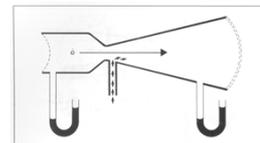


Abbildung 2.11: Ansaugen einer Flüssigkeit durch ein Venturistück.

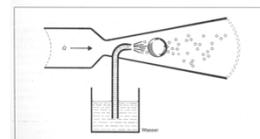
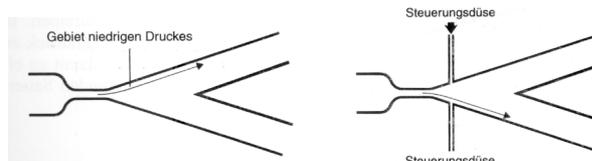


Abbildung 2.10: Prinzip eines Venturistücks.

Coanda-Effekt

- Tendenz eines Gasstrahls oder einer Flüssigkeitsströmung, an einer konvexen Oberfläche „entlangzulaufen“, anstatt sich abzulösen und sich in der ursprünglichen Fließrichtung weiterzubewegen.
 - molekulare Van-der-Waals-Wechselwirkung / Adhäsion
- Anwendung:
 - Ventilmechanismus ohne bewegliche Teile (Flüssigkeitslogik)



**Danke für Ihre
Aufmerksamkeit**