

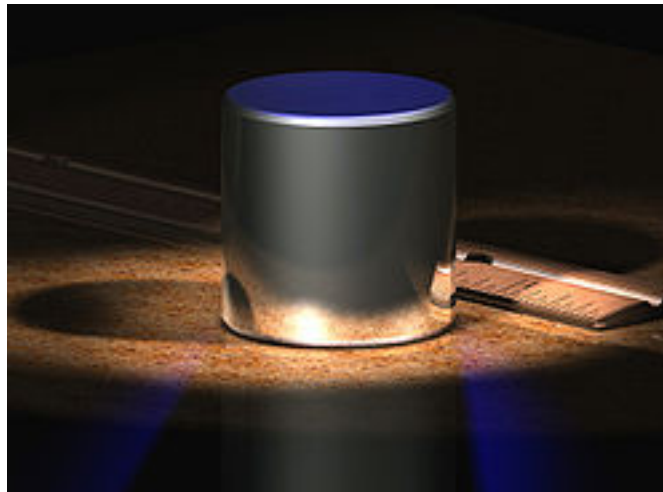
Anestesiologisk fysik

Fredrik Öberg

Anestesikliniken
Karolinska Solna

Massa

- SI grundenhet 1 **kg**



General Conference on Weights and Measures (CGPM) agreed in principle that the kilogram should be redefined in terms of the Planck constant, but deferred a final decision until its next meeting, scheduled for 2014. In 2014 it was deferred again until the next meeting.

Längd

- SI grundenhet 1 m



Numera definierad med hjälp av ljushastigheten i vacuum

Tid

- SI grundenhet **1 sekund**

the duration of 9,192,631,770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the caesium 133 atom

Kraft

- SI-enhet 1 **Newton** = $1 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$
- Härledd enhet:
”den kraft som går åt för att ge en massa av 1 kg en acceleration av 1 m/s per sekund”

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$$

Energi

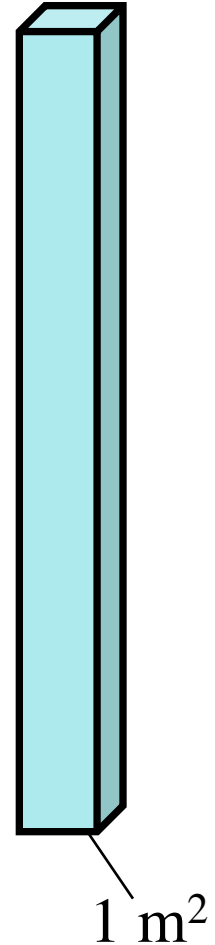
- SI-enhet 1 **Joule** = 1 Nm
- 1 kcal = 4,2 kJ
- Arbete, värme, entalpi, lägesenergi, rörelseenergi, elektrisk, kemisk, $e=mc^2$
- Bensin förbränning ger 34.2 MJ per liter (= 8000 kcal)

Tryck

- SI-enhet 1 **Pascal** (Pa) = 1 N/m²
- VÄldigt liten enhet
- 1 **Atm** = 1 **ata** = 101,3 kPa = 760 mm Hg
- **cmH₂O**

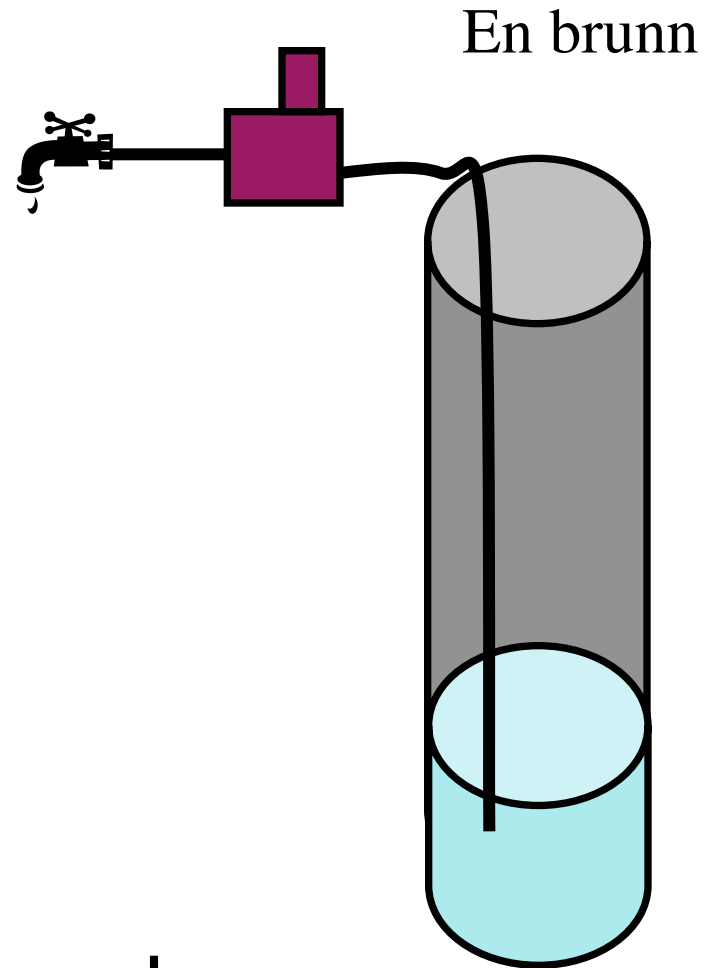
Tryck

- Hur många cmH₂O är 1 atmosfär ?
- $1 \text{ atm} \approx 100 \text{ kPa} = 100\,000 \text{ Pa} =$
 $100\,000 \text{ N/m}^2 \approx 10\,000 \text{ kg/m}^2 =$
 $10\,000 \text{ L H}_2\text{O/m}^2 = 10 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O/ m}^2$
- $1 \text{ Atm} = 10 \text{ meter vattenpelare!}$



Tryck

- Det är inte pumpen som suger – det är lufttrycket som trycker upp vattnet
- Ingen pump kan suga högre än 10 meter!
- Om brunn > 10 m:
Pumpen måste ner i brunnen!



Tryck

- **1 Bar** \approx **1 Atm** (def: 1 Bar = 100 kPa)
- **4 Bar**: Sjukhusets gasledning
- **12 Bar** "instrumentluft"
- **O2-cylinder**: 137 bar

- **1 torr** \approx **1 mmHg** (def: 7,5 torr = 1kPa)


- **PSI** (14,5 PSI = 1 bar)

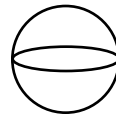
Tryck - klinik

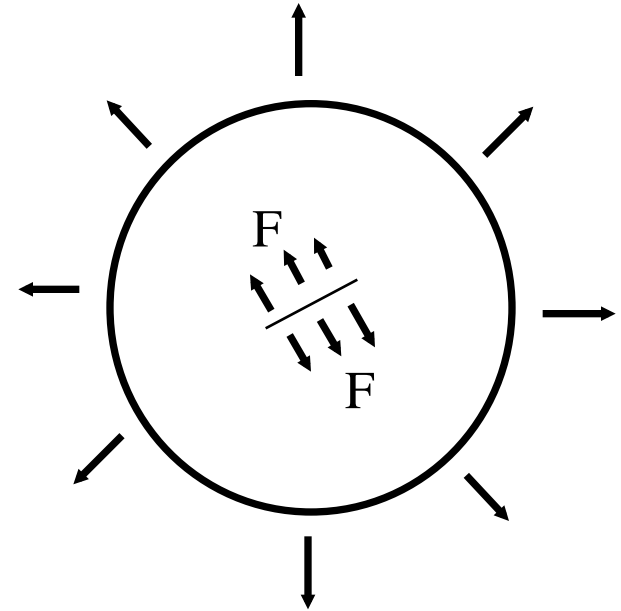
- 5,3 kPa = 40 mmHg (pCO₂)
- 13 kPa = 100 mmHg (pO₂)
- **10 mmHg = 13,6 cmH₂O** (CVP)
eftersom kvicksilver har densitet 13,6 g/cm³

Väggspänning (tension)

- Enhet: N/m

- Cylinder: $T = P \times R$ 

- Sfär: $T = 1/2 \times P \times R$ 



- Större radie – lägre tryck (vid samma väggspänning)
Större radie – högre spänning (vid samma tryck)
- Blåsa upp en ballong
- Hjärtförstoring – sämre prestanda
- Ytspänning i alveoler – svårt öppna, lättare hålla öppet!

Gaslagarna

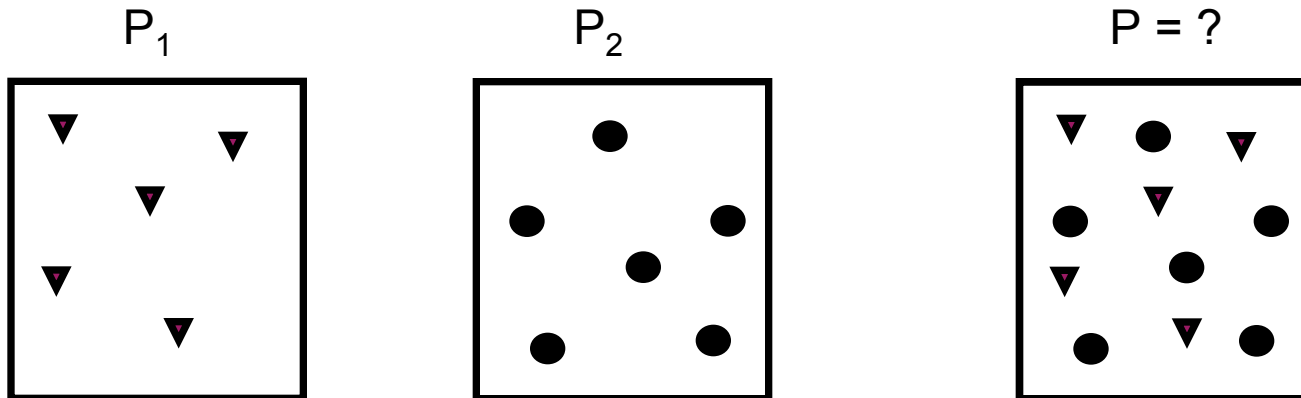
- $P \times V = n \times R \times T$
 - P = tryck (pascal)
 - V = volym (liter)
 - n = antal mol
 - R = allmänna gaskonstanten
8.314472 (J/mol x K)
 - T = temperatur (Kelvin)
- Avogadros hypotes – gäller oberoende av vilken gas (ideal)
- En mol upptar 22,4 liter vid STP
- STP =
 - 0°C (273,15 K)
 - 1 atm (760 mmHg = 101,325 kPa)
- Avogadros tal = $6,022 \times 10^{23}$ = antal partiklar i en mol

Gaslagarna

- Boyles lag $P \times V = \text{konstant}$ (vid konstant temp)
- Charles lag $V = \text{konstant} \times T$ (vid konstant tryck)
- 3:e lagen $P = \text{konstant} \times T$ (vid konstant volym)

Blandning av gaser

Partialtryck



- Daltons lag $P = P_1 + P_2$, dvs trycket är summan av partialtrycken

Adiabatiska förändringar

- Adiabatisk förändring = förändring utan värmeutbyte med omgivningen
- Adiabatisk kompression av gas – temperaturen ökar!
 - Cykelpump
 - Tryckkammaren
- Adiabatisk expansion – temperaturen minskar
 - Snabb tömning av gasflaska
 - Kryoprob
- Ovanstående är INTE en följd av gaslagarna

Kritisk temperatur

- Komprimera en gas – gasen övergår i vätskeform

men...

- Kritisk temperatur den högsta temperatur vid vilken en gas över huvud taget kan förekomma i vätskeform
- Vid ännu högre temperatur aldrig vätska, oavsett hur högt tryck!

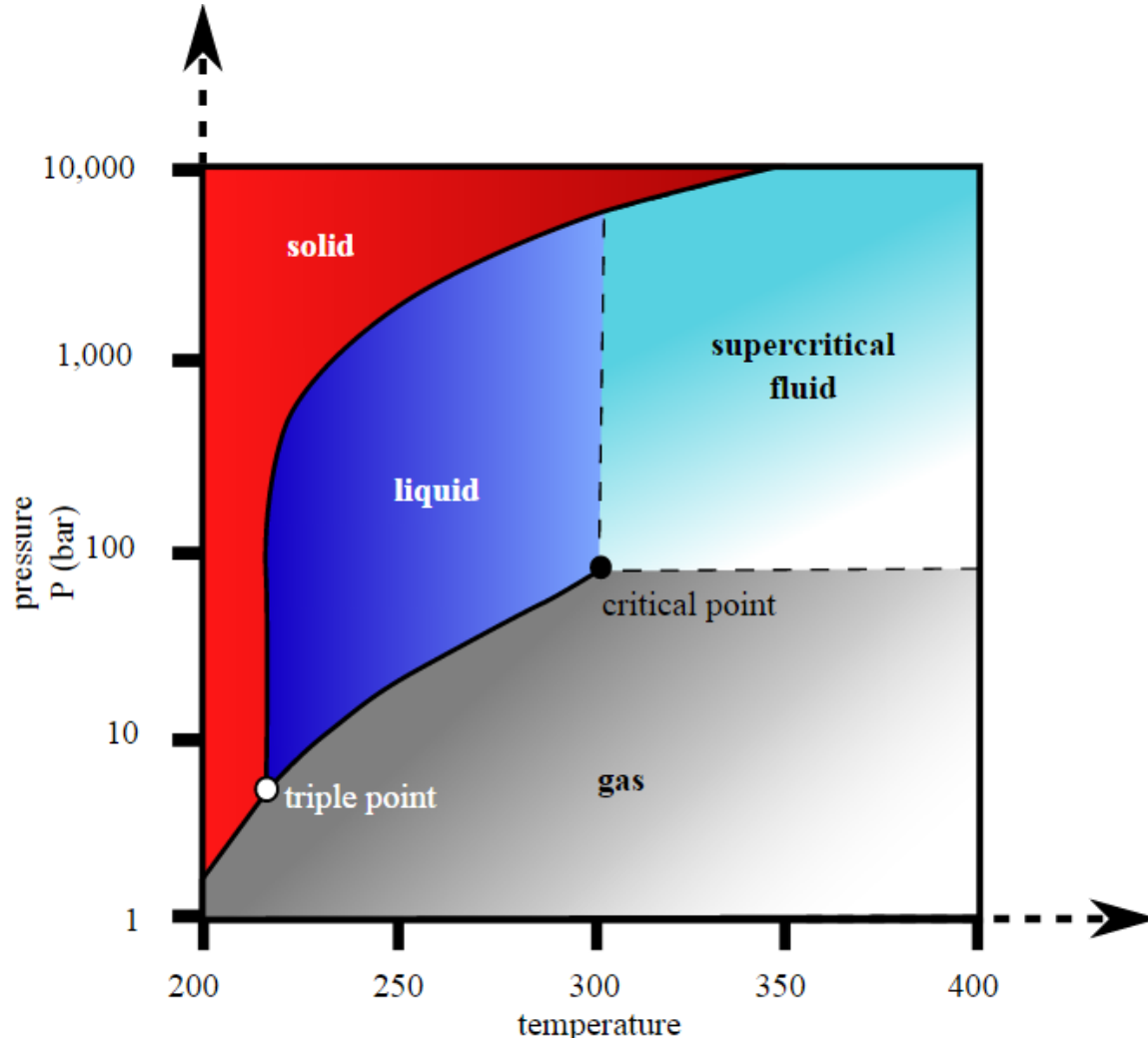
Kritisk temperatur

- O₂ - 183 °C
- N₂ - 195 °C
- N₂O + 36,5
- CO₂ + 31 °C
- Entonox - 7 °C
(=50/50 O₂/N₂O)

Kritiskt tryck =

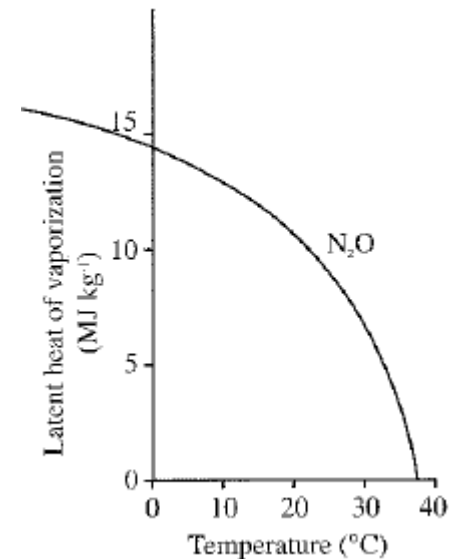
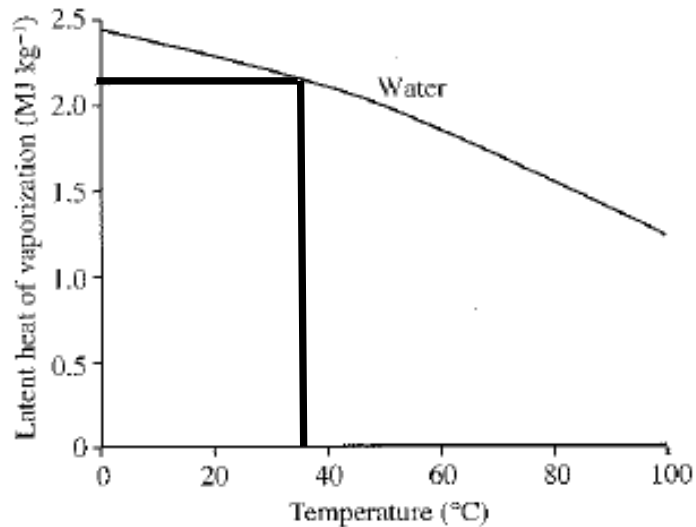
Det tryck som krävs för att omvandla gas till vätska vid gasens kritiska temperatur

CO₂ vid höga temperaturer



Avdunstning

- Kräver energi
- Ångbildningsvärme (latent heat of vaporization)

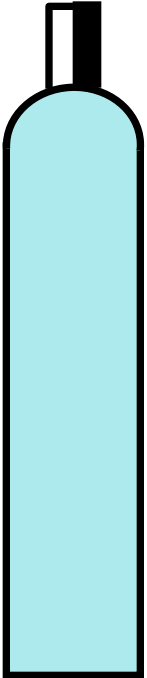


Vatten: Ca 2,1 MJ per kg vid 37 grader, dvs 1000 kcal per 2 kg vatten som avdunstar

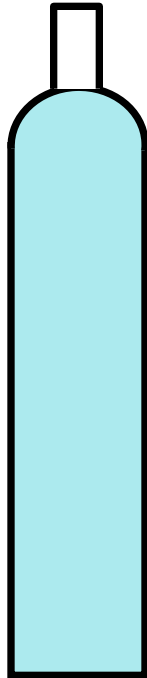
Bensin förbränning ger 34.2 MJ per liter (= 8000 kcal)

Gastuber

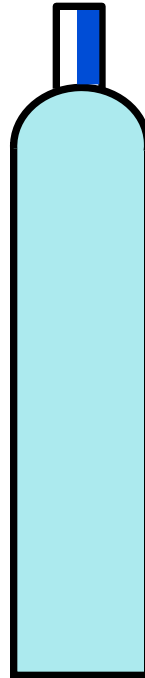
Luft
Gas
137 bar



O₂
Gas
137 bar



Entonox
Gas
137 bar



N₂O
Vätska
ca 50 bar



CO₂
Vätska
ca 50 bar



Gastuber 2

Fast i hissen:

Hur länge räcker en halvfull 10-liters syrgastub vid 12 liter/ minut?

$137 / 2 = \text{halva trycket} = \text{ca } 70 \text{ bar}$

$P \times V = n \times R \times T$

Långsam tömning - Antag konstant temperatur

P minskar 70 ggr, då måste V öka 70 ggr
10 liters tub, alltså 700 liter syrgas

$700/12 = 58 \text{ minuter}$

Gastuber 3

Hur länge räcker en halvfull tub med lustgas vid 12 liter/minut?

Hmm...



vätska...

Manometern visar.... ?

50 Bar

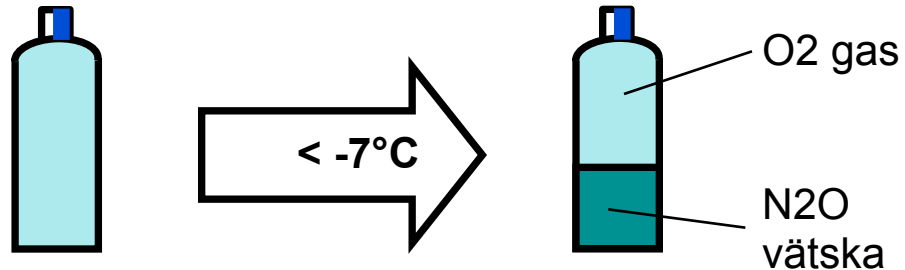
Cylindern full ! ?

Lustgastuber måste vägas !
Gäller även CO₂ förstås

Entonox

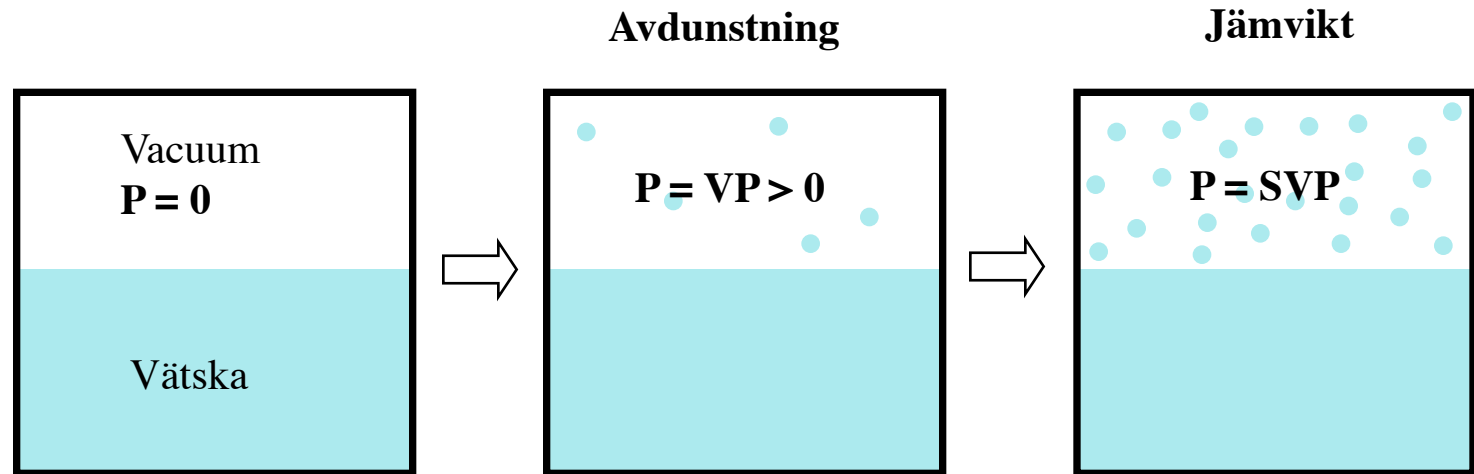
- Kritisk temperatur: $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$

- Under $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$
separation:



- Tömning av kall tub:
Först kommer ren O_2
Sedan kommer ren N_2O ...
Farligt!
- Vid kall väderlek:
Måste lagras inomhus ($>5^{\circ}\text{C}$) minst 24 timmar före användning

Avdunstning, ångtryck

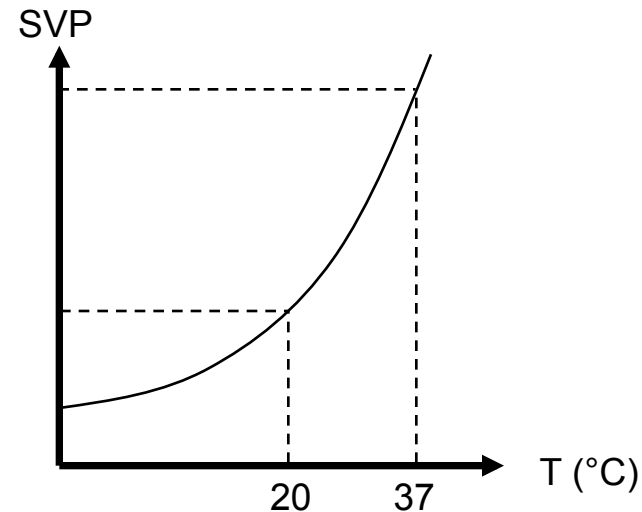


- Ångtryck = vapour pressure (VP)
Partialtrycket för gasformen av en vätska
 - Mättnadstryck = saturated vapour pressure (SVP)
= ångtrycket vid jämvikt, då gasen är "mättad" med vätska
 - SVP **ökar** med temperaturen
-

Luftfuktighet

- Relativ luftfuktighet = $\frac{VP_{H_2O}}{SVP_{H_2O}}$ (%)

- SVP_{H_2O} beror av temperaturen



- SVP_{H_2O} vid 37 °C = 6,3 kPa
(= 44 g/m³, motsv ca 60 liter vattenånga per kubikmeter luft)

Luftfuktighet

SVP_{H₂O} :

T(C)	T(F)	P(kPa)	P(torr)	P(atm)
0	32	0.6113	4.5851	0.0060
5	41	0.8726	6.5450	0.0086
10	50	1.2281	9.2115	0.0121
15	59	1.7056	12.7931	0.0168
20	68	2.3388	17.5424	0.0231
25	77	3.1690	23.7695	0.0313
30	86	4.2455	31.8439	0.0419
35	95	5.6267	42.2037	0.0555
40	104	7.3814	55.3651	0.0728
45	113	9.5898	71.9294	0.0946
50	122	12.3440	92.5876	0.1218
55	131	15.7520	118.1497	0.1555
60	140	19.9320	149.5023	0.1967
65	149	25.0220	187.6804	0.2469
70	158	31.1760	233.8392	0.3077
75	167	38.5630	289.2463	0.3806
80	176	47.3730	355.3267	0.4675
85	185	57.8150	433.6482	0.5706
90	194	70.1170	525.9208	0.6920
95	203	84.5290	634.0196	0.8342
100	212	101.3200	759.9625	1.0000

Luftfuktighet 2

Vad händer med "luftfuktigheten" när temperaturen ökar ?
(men mängden vatten lika)?

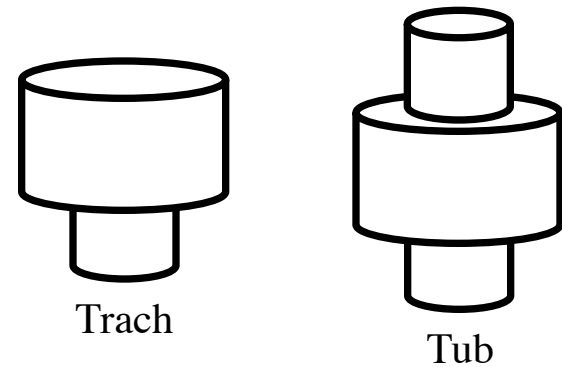
Den minskar!

Vad händer med mängden vatten i luften om temperaturen ökar
(vid konstant luftfuktighet)

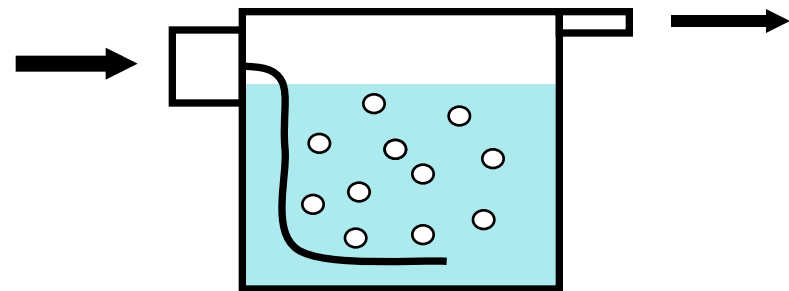
Den ökar!

Befuktare

- Normalt i trachea: 34 g H₂O / m³
- "Näsa", "filter"
"Heat and moisture exchange filter"
Upp till 25 g H₂O / m³
dvs ca 70% effektiv (optimalt)
Sämre varm, och vid hög minutvolym

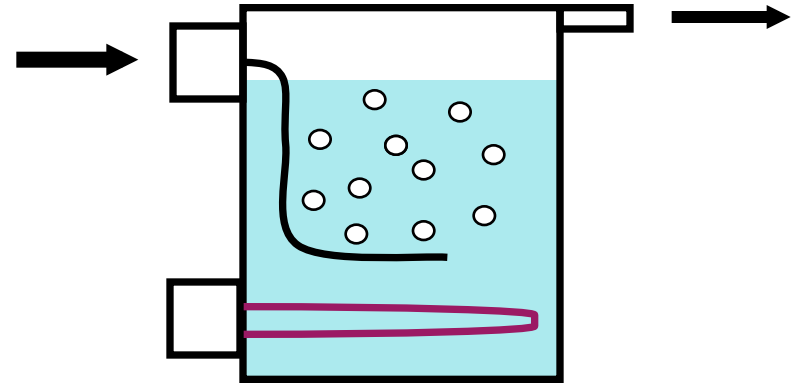


- Vattenbehållare
Helt kass
Vattnet kyls – luften kyls
Låg befuktning

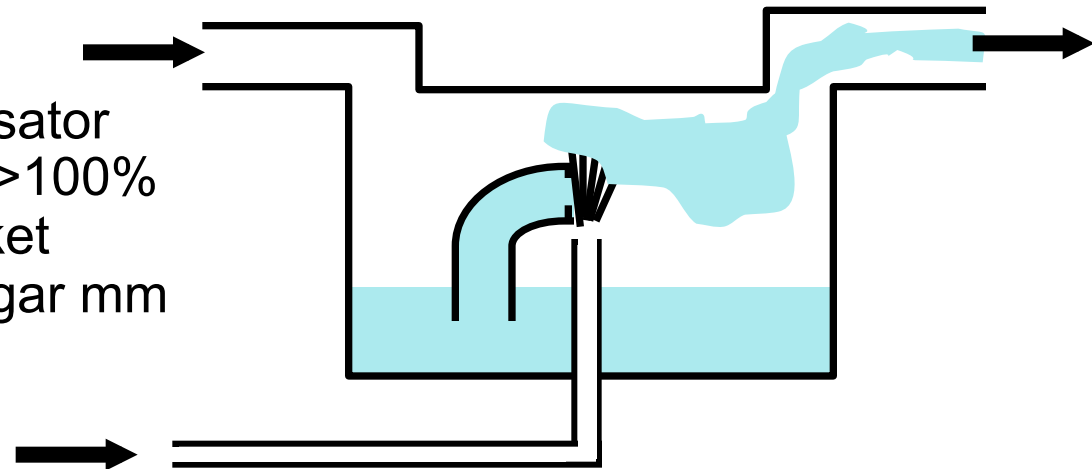


Befuktare

- Vattenbehållare med värmare
40 - 60 grader
Effektiv befuktning
Risk för skållning vid fel



- Bernoulli nebulisator
Kan producera >100%
Kan bli för mycket
Utfällning i slangar mm



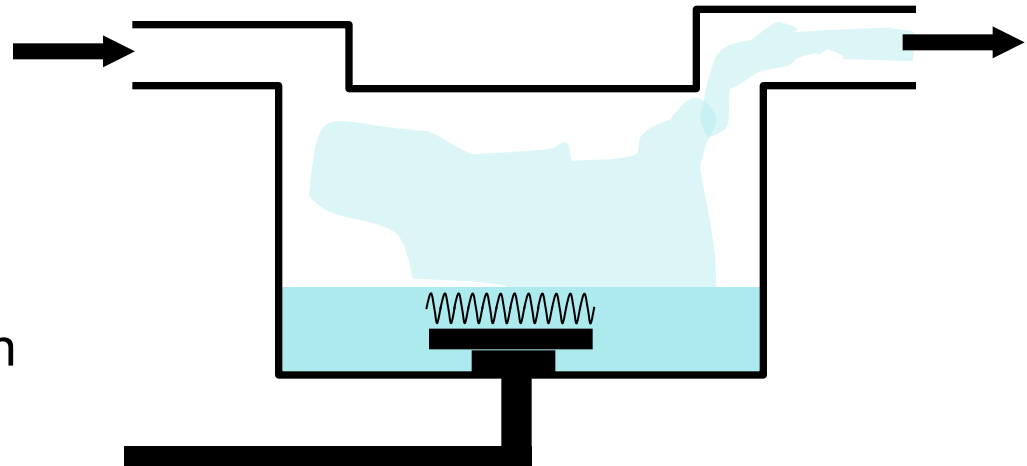
Befuktare

- Ultraljudsnebulisator

Kan producera >100%
Kan bli för mycket vatten

Mindre droppstorlek –
gynnsamt, ty når ända ner
i alveoler, och faller ej
ut i slangar mm

- Användbart för läkemedel



Droppstorlek

20 μm

5 μm

1 μm

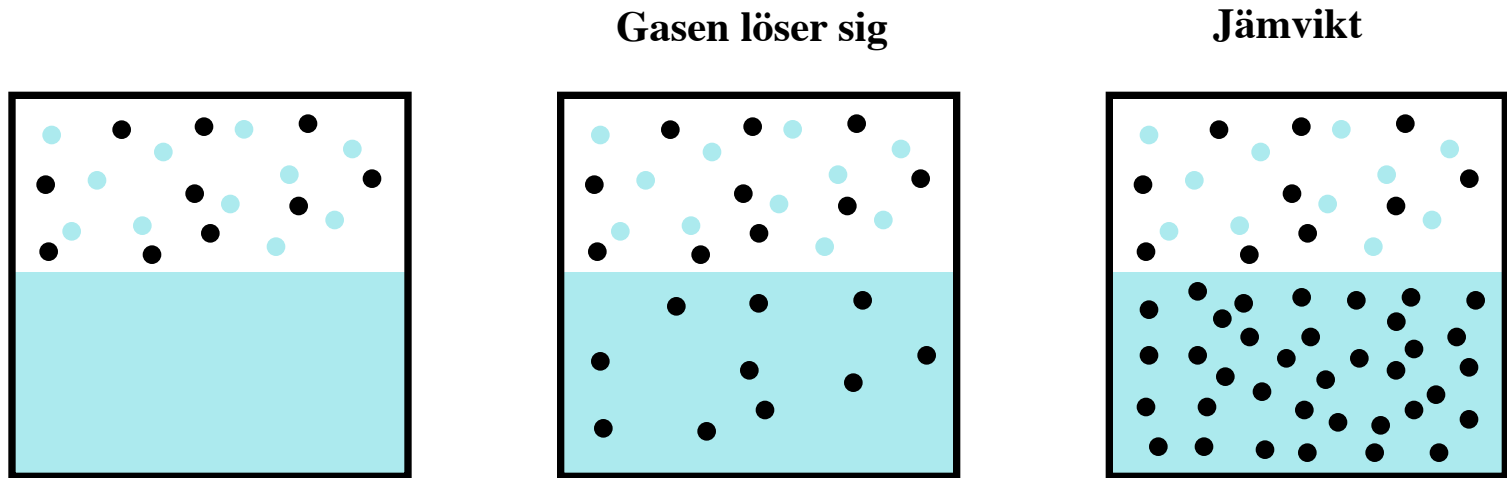
Fäller ut i

slangar, mun, näsa

trachea

alveoler

Gasers löslighet

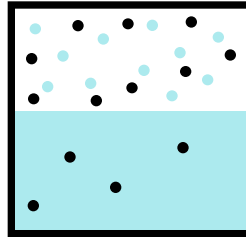


- Löslighetskoefficient = volym löst gas per volym vätska
Volym löst gas betyder här volymen mätt som gas (alltså inte volymen som upptas av gasen när den löst sig, ty den volymen är oftast försumbart liten)
- Löslighetskoeff. är oberoende av trycket, eftersom...
- Mängden löst gas (mol) är proportionell mot trycket (Henrys lag)

Gasers löslighet

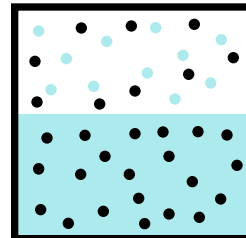
■ N₂O

$k=0,47$



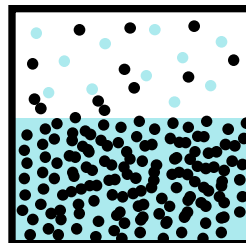
■ Halotan

$k=2,4$



■ Eter

$k=12$



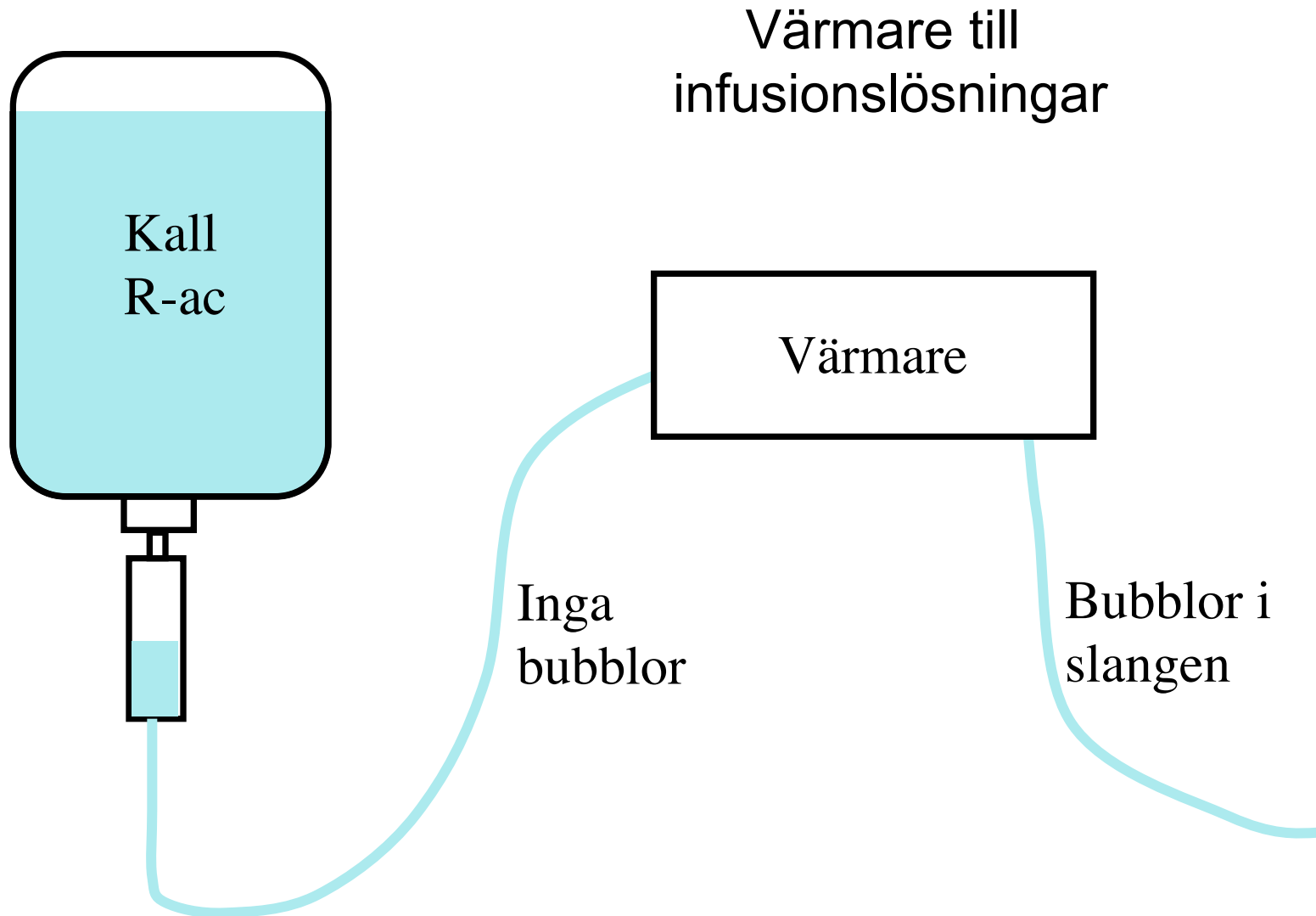
Gasers löslighet

- Löslighetskoefficienten är oberoende av trycket...
- ...men mängden löst gas (antal mol gas) vid jämvikt _____ med ökande tryck (Henrys lag). (antag konstant temperatur)
- Löslighetskoefficienten är oberoende av temperaturen...
- ...men mängden löst gas (antal mol gas) vid jämvikt _____ med ökande temperatur (antag konstant tryck)

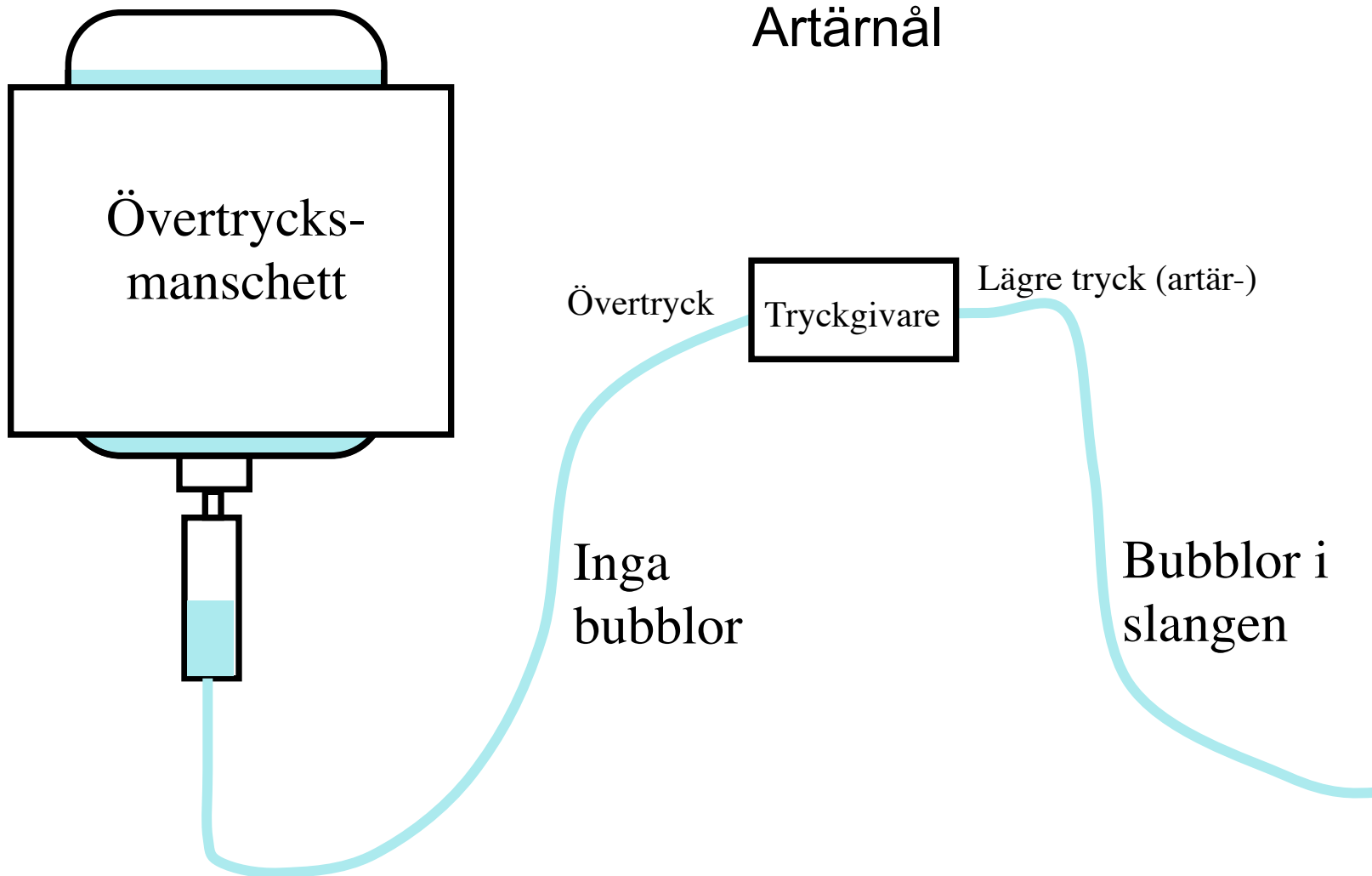
Gasers löslighet

- Löslighetskoefficienten är oberoende av trycket...
- ...men mängden löst gas (antal mol gas) vid jämvikt ökar med ökande tryck (Henrys lag). (antag konstant temperatur)
- Löslighetskoefficienten är oberoende av temperaturen...
- ...men mängden löst gas (antal mol gas) vid jämvikt minskar med ökande temperatur (antag konstant tryck)

Gasers löslighet

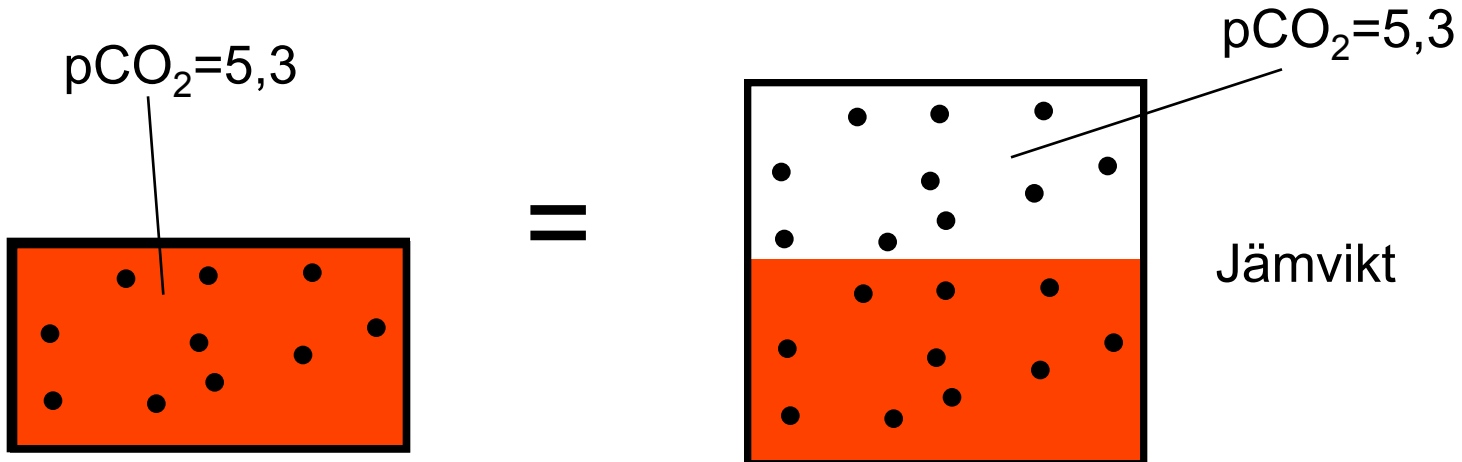


Gasers löslighet



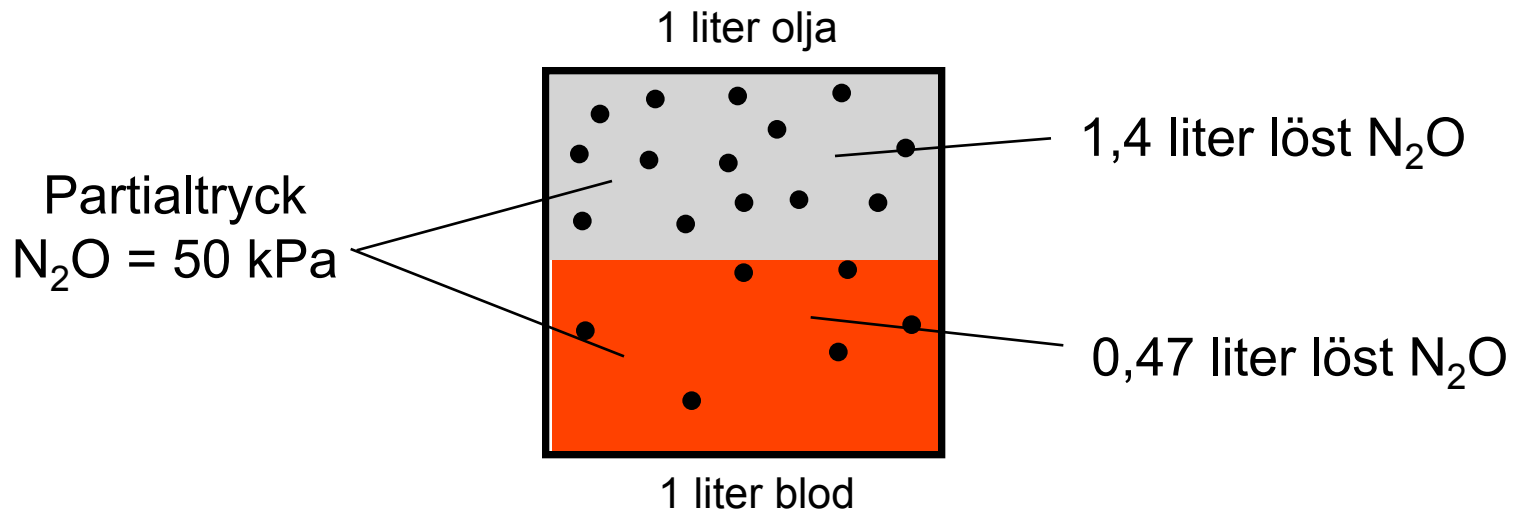
Gasträck i en vätska

- Partialtrycket av en gas löst i en vätska = ett mått på koncentrationen gas i vätskan.
- Partialtrycket i vätskan = det partialtryck av gasen i gasform som vid jämvikt skulle ge den aktuella gaskoncentrationen i vätskan
- Partialtryck = eng. “partial pressure” = eng. “tension”



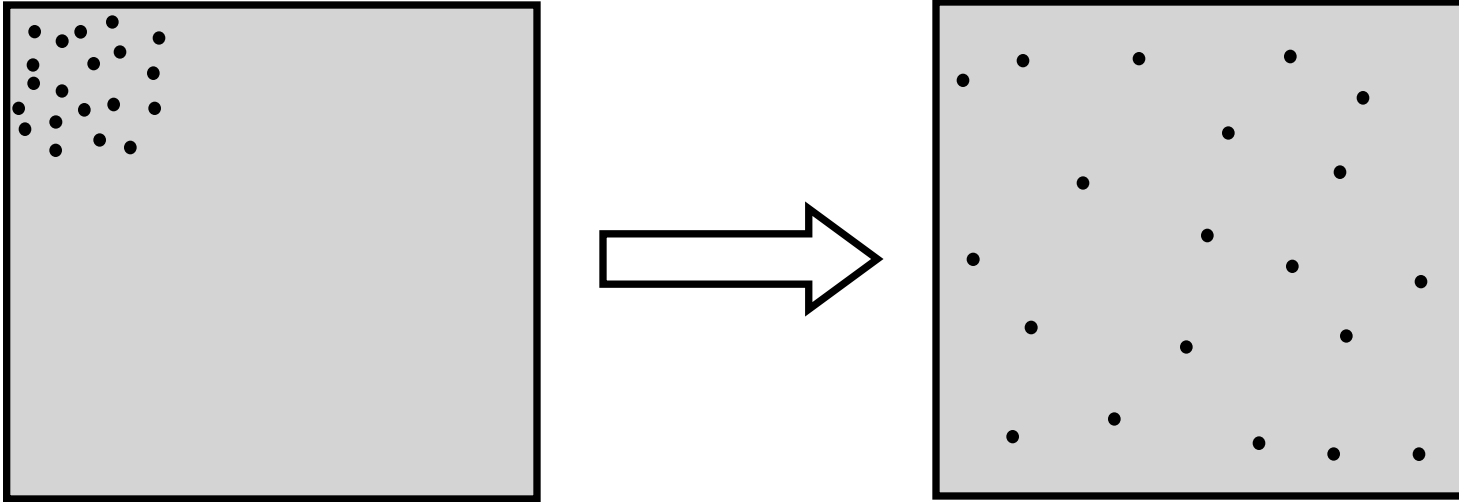
Partitionskoefficient

- En gas har olika löslighet i olika vätskor
- Relationen anges av partitionskoefficienten



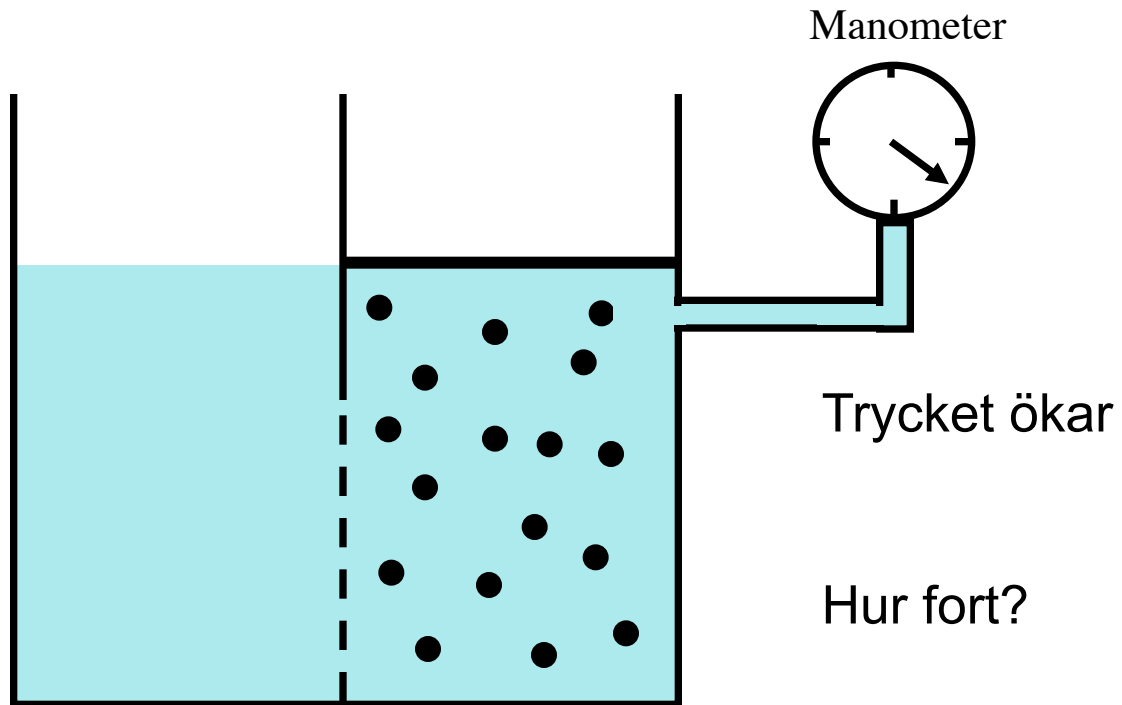
- Blod/olja partitionskoeff $N_2O = 0,33$ ($0,47/1,4$)

Diffusion

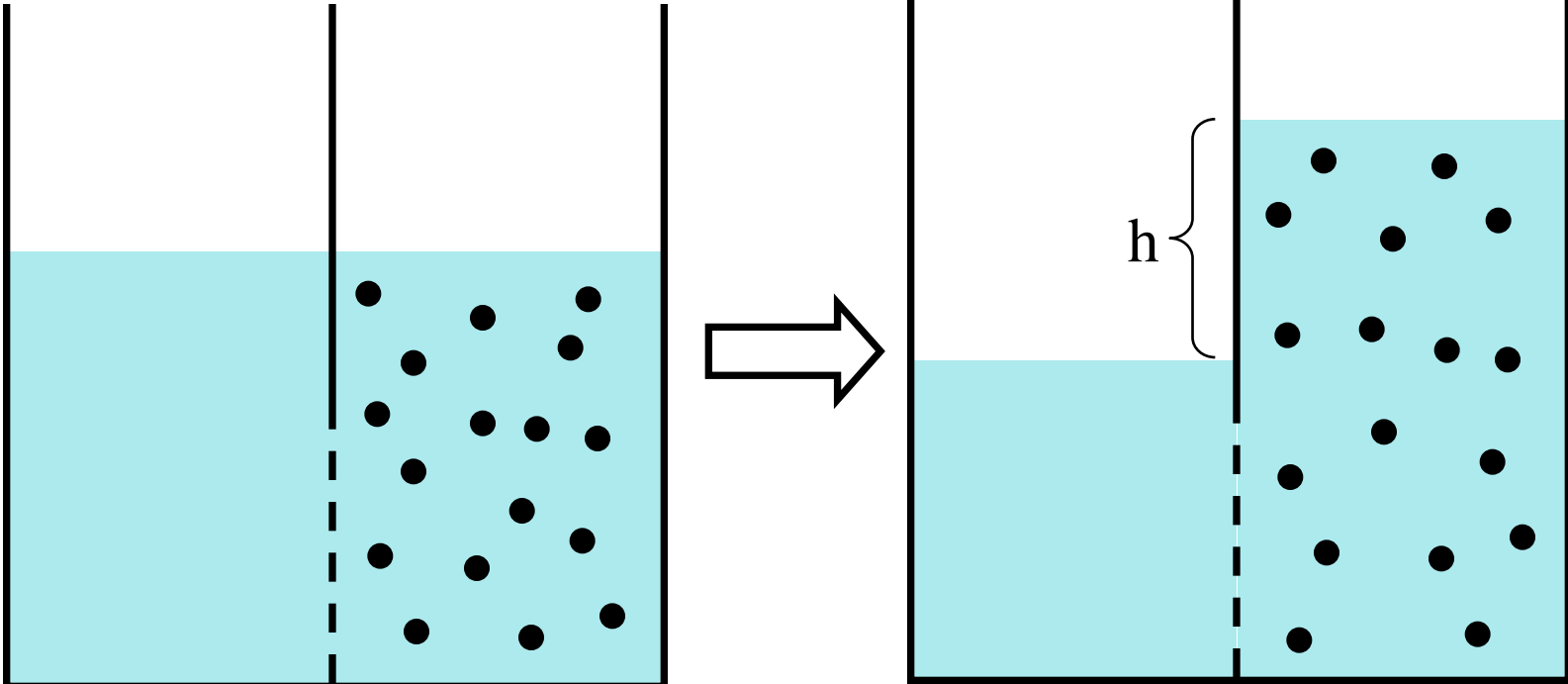


- Små molekyler diffunderar snabbare än stora
- Diffusion går snabbare vid högre temperatur
- Diffusion snabbare i gas än i vätska

Osmos

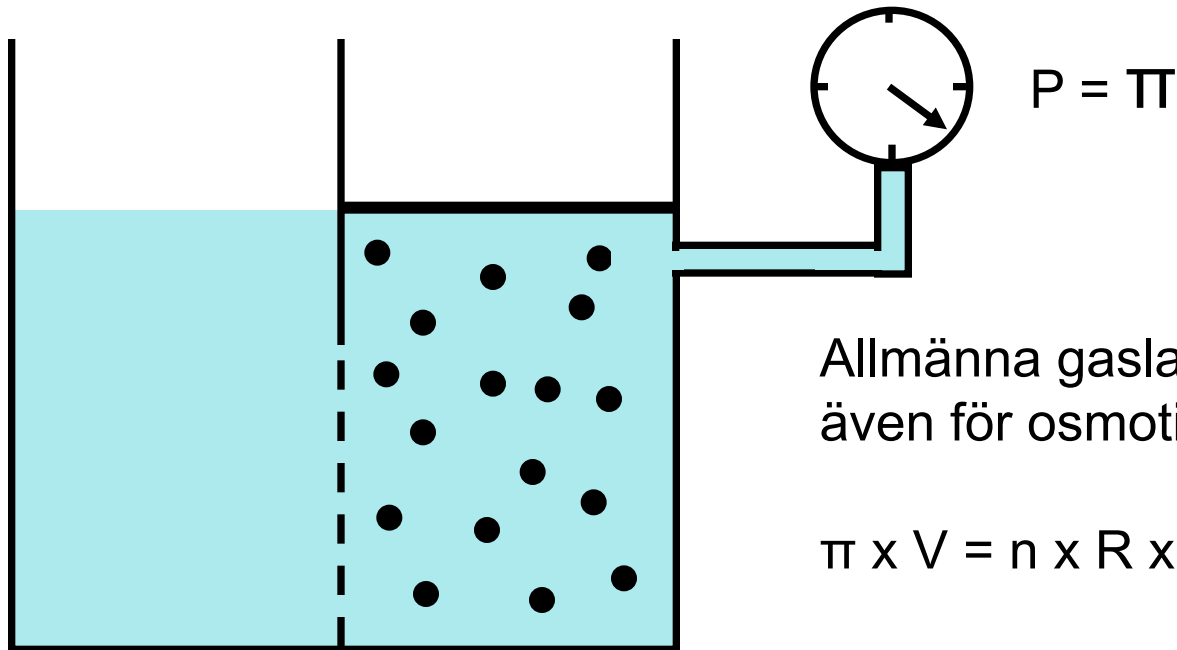


Osmos



Osmotiskt tryck

Brukar betecknas med Π



Allmänna gaslagen gäller även för osmotiskt tryck!

$$\Pi \times V = n \times R \times T$$

Om det lösta ämnet är en gas:
Är osmotiska trycket lika med partialtrycket?

Nej! Bara om löslighetskoefficienten = 1

Onkotiskt tryck

Onkotiskt tryck är den del, av det totala osmotiska trycket i plasma, som beror på stora proteinmolekyler (ffa albumin)

Osmolaliteten av dessa molekyler är totalt ca 1 mosmol/liter

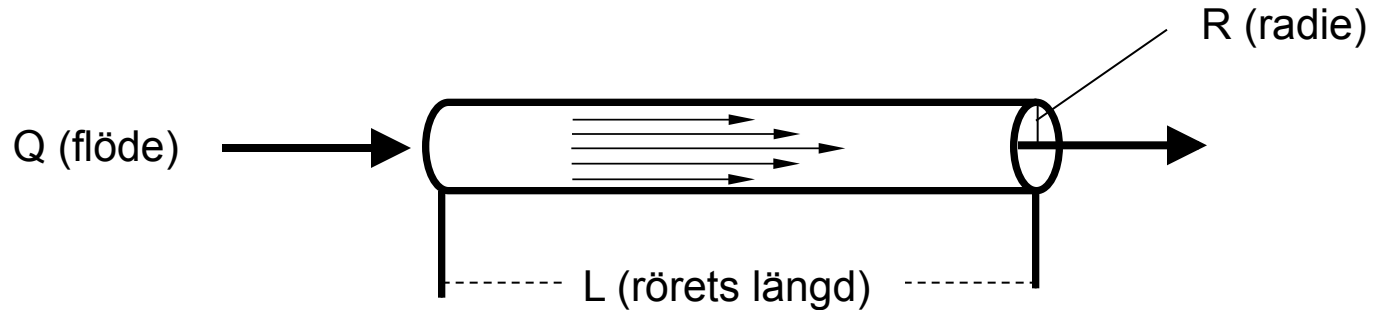
Onkotiska trycket av detta är ca 3,5 kPa

Viskositet och densitet



- Viskositeten η (gr. "äta") = kraften F i förhållande till yta, hastighet, och vätskeskiktets tjocklek, enhet Ns/m^2
- Densitet ρ (gr. "rå") = massa per volym, enhet kg/m^3

Laminärt flöde



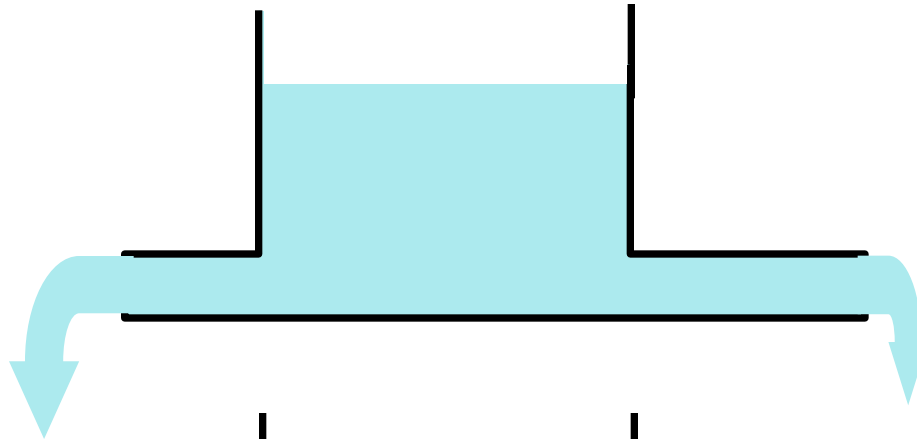
Poiseuilles lag

$$Q = \frac{\pi \times \Delta P \times R^4}{8 \times \eta \times L}$$

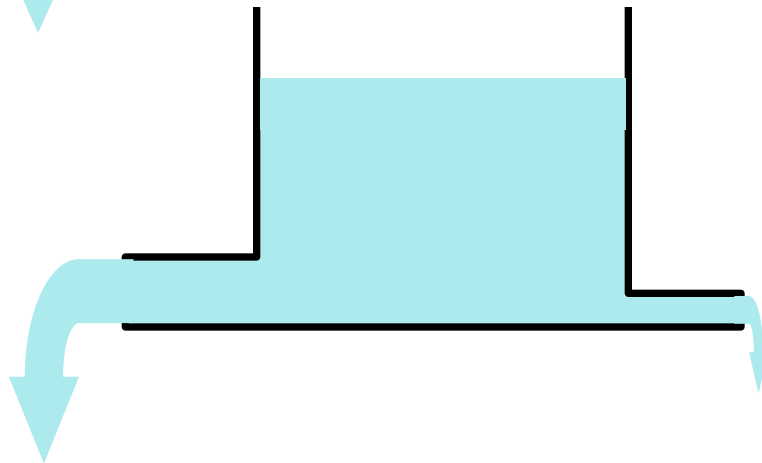
- Newtonsk vätska/gas
- Cylindriska släta rör

Flöde i CVK, PVK mm för olika vätskor...
Trachealtuber

Laminärt flöde

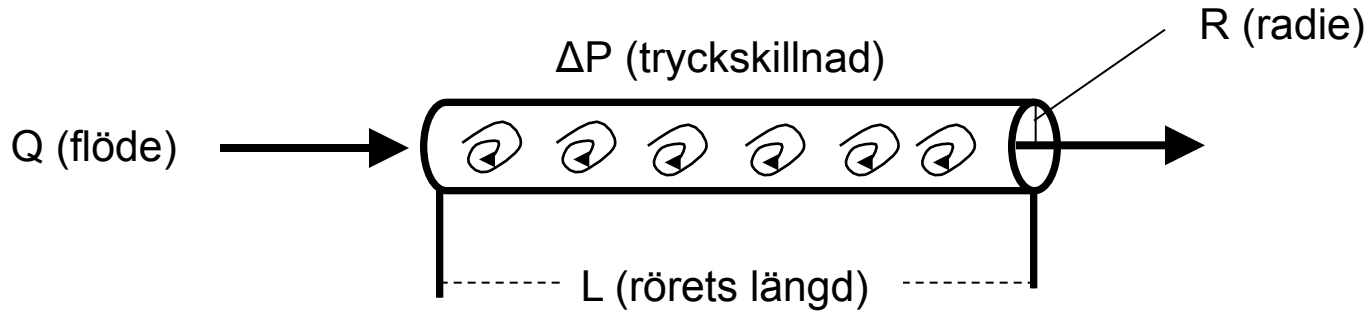


Dubbla längden
Halverat flöde !

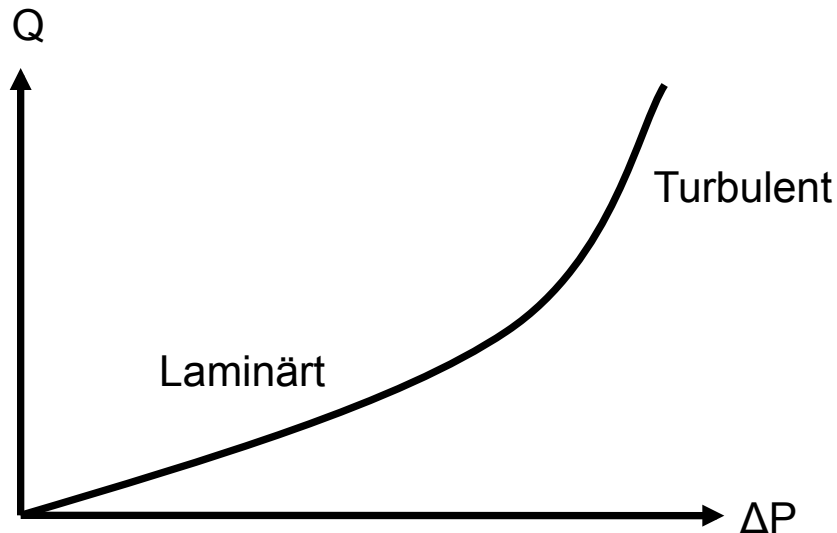


Halva diametern
16 ggr mindre flöde !

Turbulent flöde



Poiseuilles lag gäller inte turbulent flöde.



Mycket högre tryck krävs vid turbulent flöde

Turbulent flöde

Reynolds tal

$$R = \frac{v \times \rho \times r}{\eta}$$

v = strömningshastighet
r = radie
 ρ = densitet
 η = viskositet

Högre densitet – mer turbulens

Högre viskositet – mindre turbulens

R anger sannolikheten för turbulent flöde!

R > 2000: oftast turbulent flöde

R < 2000: oftast laminärt flöde

Gäller i släta, runda rör

Korrugerade slangar – mer turbulens

Flöde - tillämpningar

Maxflöden vid normal andning = ca 50 liter/minut

Räkna ut R för luft....

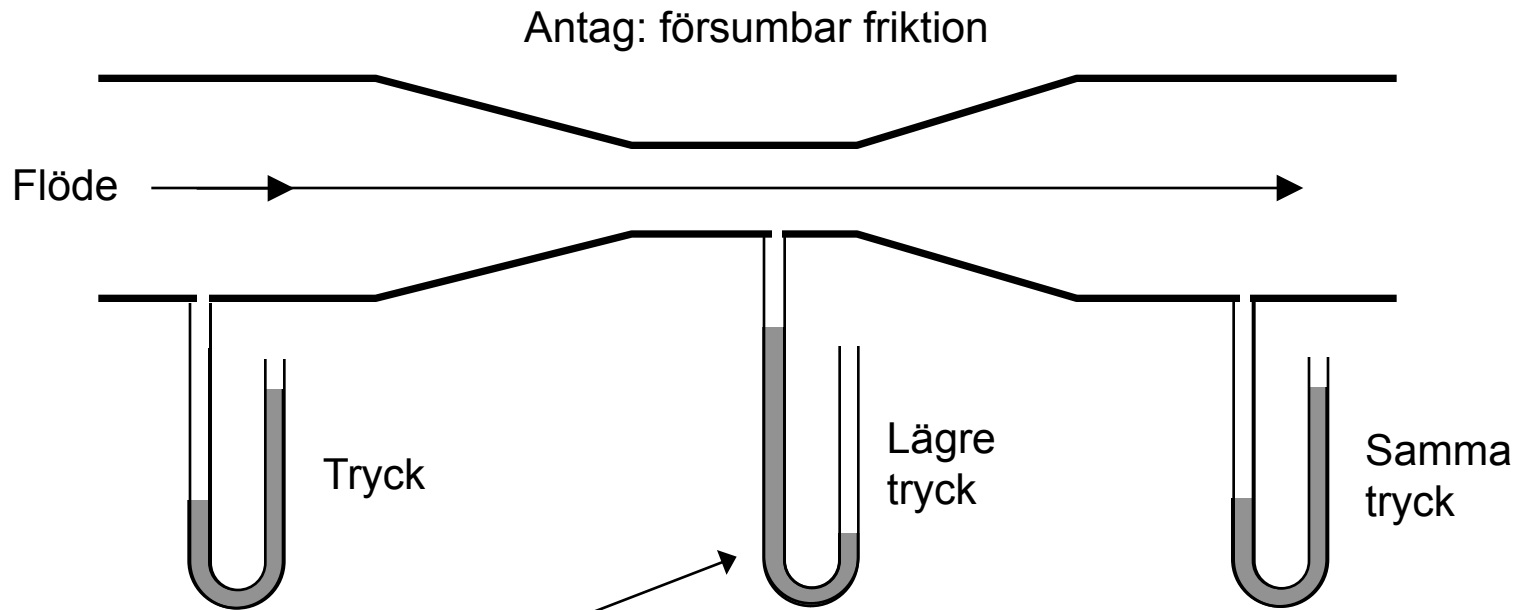
- Tub nr 6: Turbulens vid 5,33 liter/minut
- Trachealtub nr 9: Turbulens vid 12 liter/minut
- Trachea (15 mm): Turbulens vid 22 liter/minut
- Gasslangar (22 mm): Turbulens vid 30 liter/minut

Flöde - tillämpningar

Helium har låg densitet

Syrgas-Heliumblandning kan användas vid stridor, övre luftvägshinder, mm

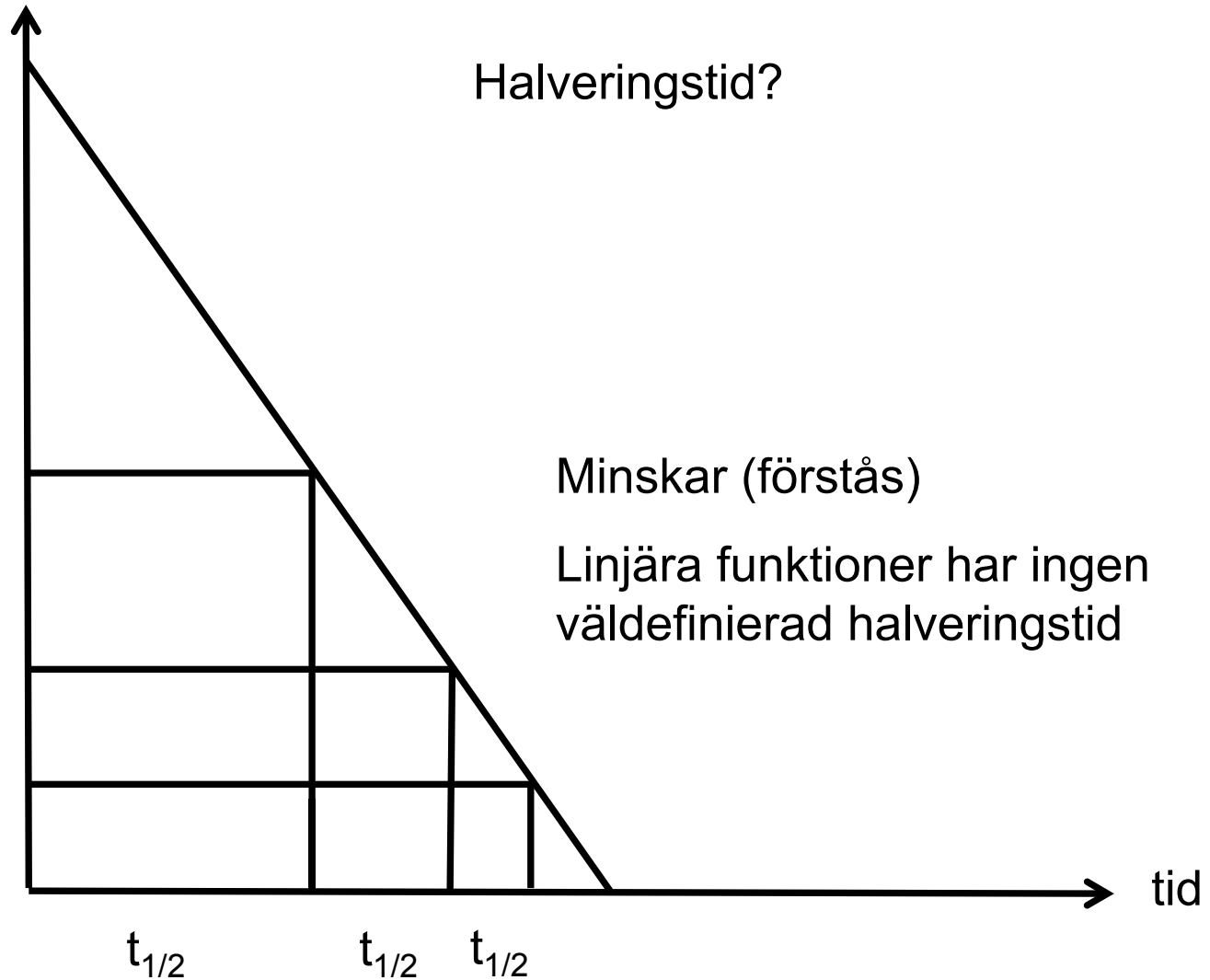
Bernoullis princip



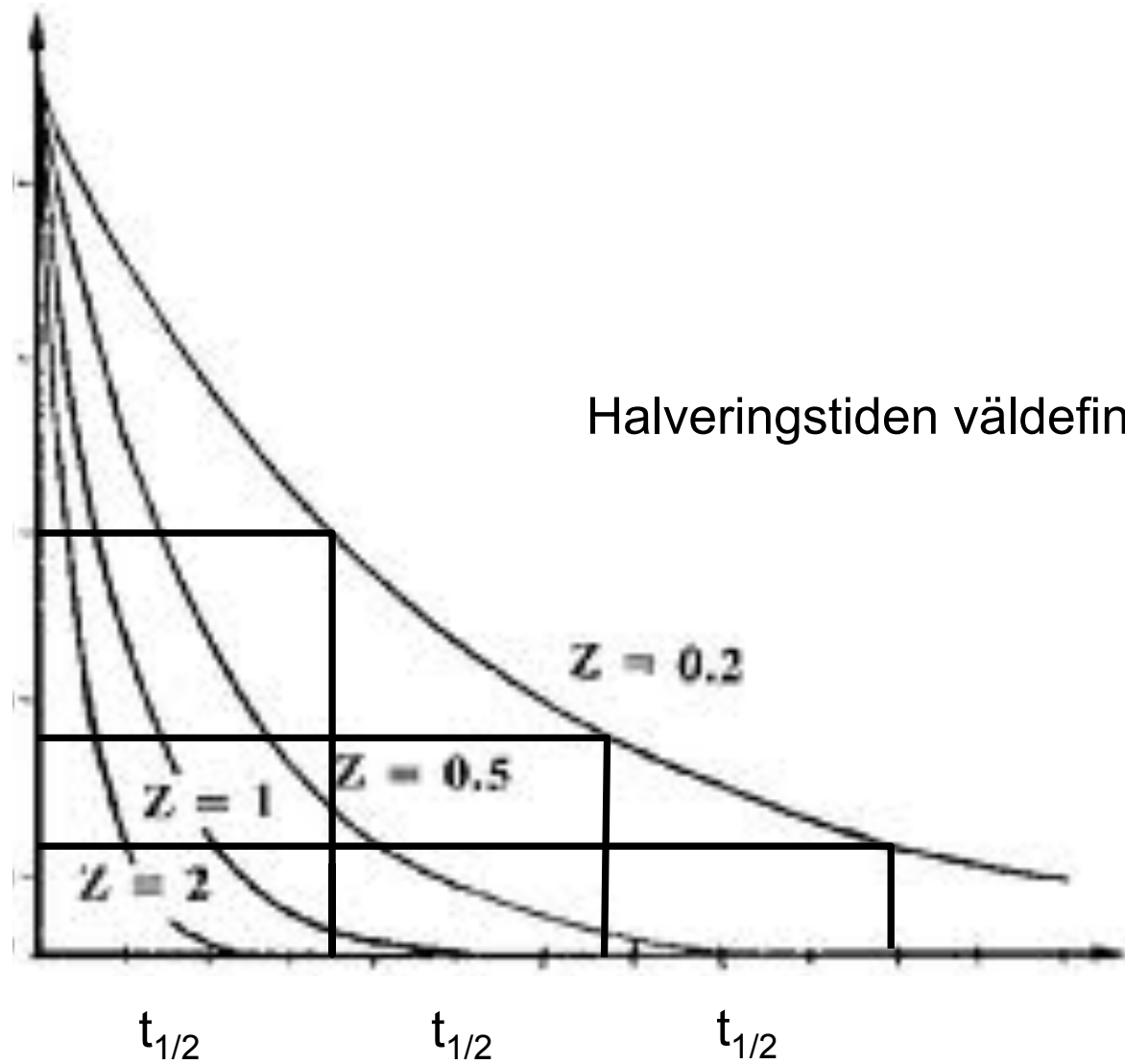
- Trycket blir lägre där hastigheten högre, dvs i stenosen

En viss given gasvolym måste ha konstant energi om ingen energi tillförs systemet (friktion= 0, konstant flöde). Gasvolymen har potentiell energi pga sitt tryck, och kinetisk energi pga hastigheten. När hastigheten ökar måste trycket minska.

Linjära funktioner

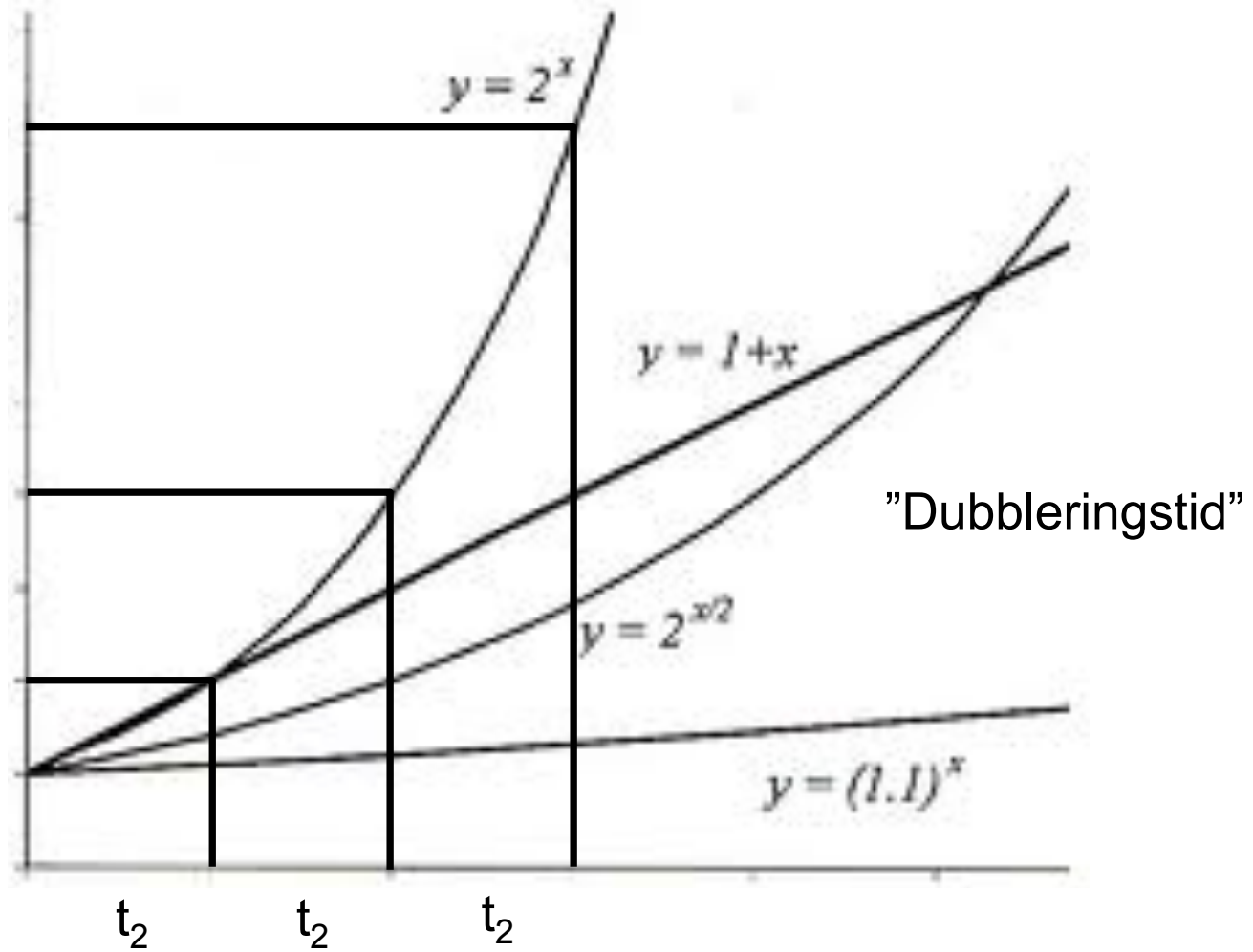


Exponentialfunktioner



Halveringstiden väldefinierad !

Exponentialfunktioner



Exponentialfunktioner

$$f(t) = Ae^{kt}$$

- Vad händer efter ytterligare tid?

- $f(t+u)$
= $Ae^{k(t+u)}$
= $Ae^{kt} \times e^{ku}$

$$= f(t) \times e^{ku}$$

Ändringen under tiden u (från tiden t till tiden u) fås alltid genom att multiplicera med en konstant ($= e^{ku}$), oavsett tiden t

Tidskonstant

$$f(t) = Ae^{-kt} \quad (t=\text{sekunder, funktionen avtar med tiden})$$

- Tidskonstanten betecknas med τ (gregiska bokstaven tau)

$$\tau = 1/k \quad \text{enhet: sekunder}$$

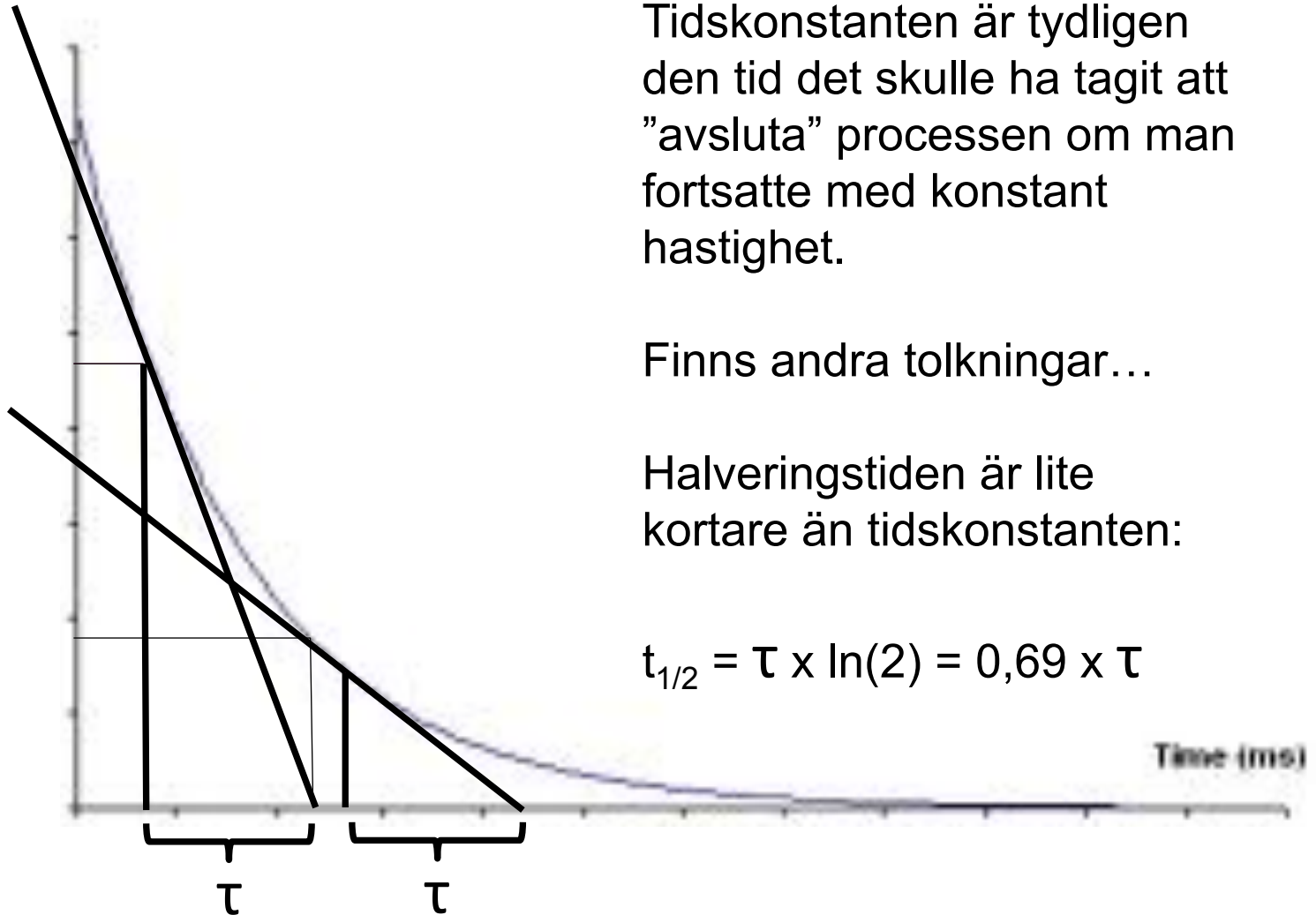
- Är τ = halveringstiden?

$t = \tau$ ger ...

$$\begin{aligned} f(\tau) &= \\ &= A e^{-1} = A \times 0,37 = \\ &= \mathbf{0,37 \times f(0)} \end{aligned}$$

τ = "0,37-tiden"
Vad är poängen???

Tidskonstant



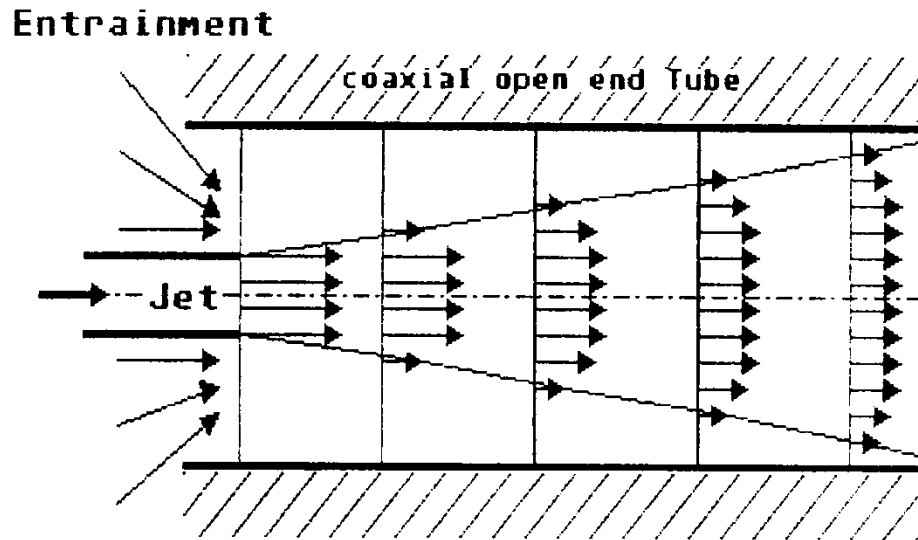
Tidskonstanten är tydligen den tid det skulle ha tagit att "avsluta" processen om man fortsatte med konstant hastighet.

Finns andra tolkningar...

Halveringstiden är lite kortare än tidskonstanten:

$$t_{1/2} = \tau \times \ln(2) = 0,69 \times \tau$$

Venturi

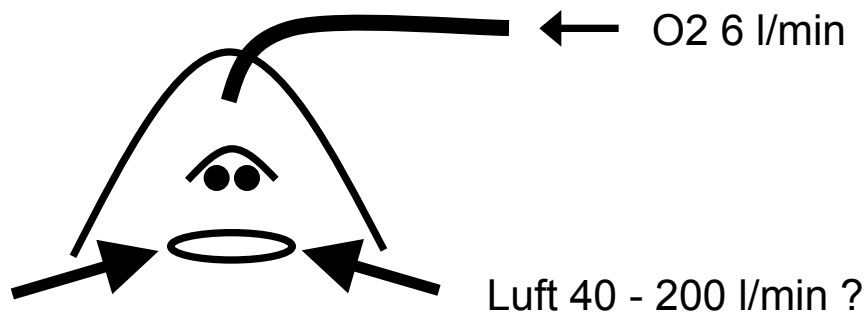


- Entrainment ratio = hur mycket luft som fångas i förhållande till jetflödet
- Ex: Syrgas.
Flöde 15 liter per minut.
Entrainment Ratio = 3:1



≈ 40% syrgas
(3 x 21% + 1 x 100%) / 4
60 liter flöde

Andningsmask, grimma

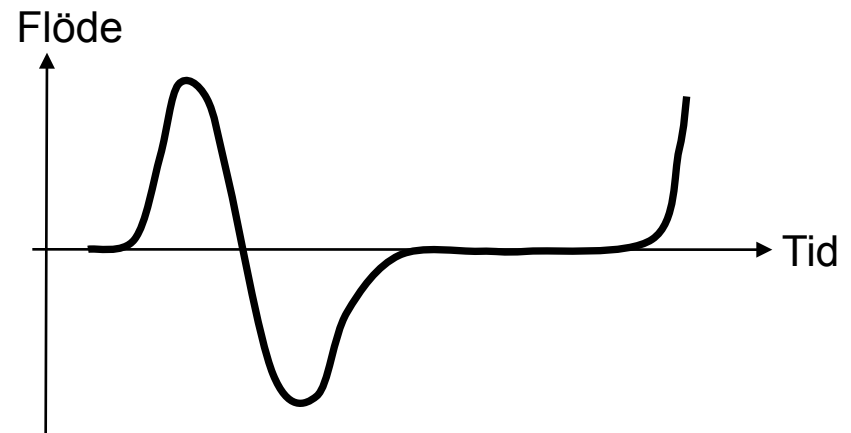


Vad blir FiO₂ ?

?

Lugn andning:
Toppflöde 30-50 l/min

Forcerad andning:
Toppflöde 200 l/min ?



Venturimask



- High-flow device = mer än 60 liter / minut
 - Venturi-effekten ger höga flöden med konstant syrgaskonc
 - Om flödet > peak inspiratory flow ("PIF") så vet man vilket FiO₂ pat erhålle
-
- Olika färger = olika entrainment ratio = definierad syrgas konc.
 - Vid O₂ 15 l/min, 40% syrgas, fås flöde 60 liter per minut
 - Men... mask med högre syrgas konc ger lägre flöden.....