

# Fysiikka 3: Energia ja lämpö

Sisällys:

1 Lämpöopin tarkastellaan termodynaamisia systeemejä

2 Energian siirtyminen johtumalla, kuljettumalla ja säteilynä

3 Lämpötila vaikuttaa aineen laajuuteen

4 Aineet sitovat ja luovuttavat energiaa

5 Aine voi esiintyä eri olomuodoissa

6 Olomuodonmuutoksissa sitoutuu tai vapautuu energiaa

7 Paine aiheutuu voimasta

8 Väliaineeseen kohdistuva paino aiheuttaa paineen

9 Mekaanisen energian ja lämpöenergian yhteys

10 Lämpöopin I pääsääntö liittyy sisä-energian muutokseen

11 Koneet muuntavat energiaa muodosta toiseen

12 Entropia kuvaa systeemin epä-järjestystä

13 Kaasun tilan muuttuminen

14 Ideaalikaasun tilanyhtälö yhdistää kaasulait

15 Energiatasapaino määrää maa-pallon ilmaston

16 Ilmastonmuutoksen hillitseminen vaatii energiatehokkaita koteja

# 1 Lämpöopissa tarkastellaan termo-dynaamisia systeemejä

## Aineen rakenne

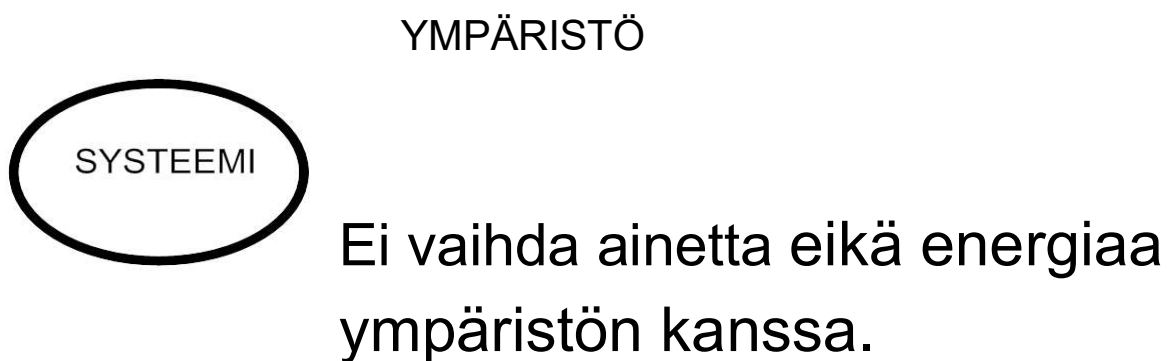
Aineen pienimpiä rakennenosia ovat atomit, molekyylit ja ionit.

Lämpöopissa aineen käyttäytymistä kuvataan TILANMUUTTUJILLA

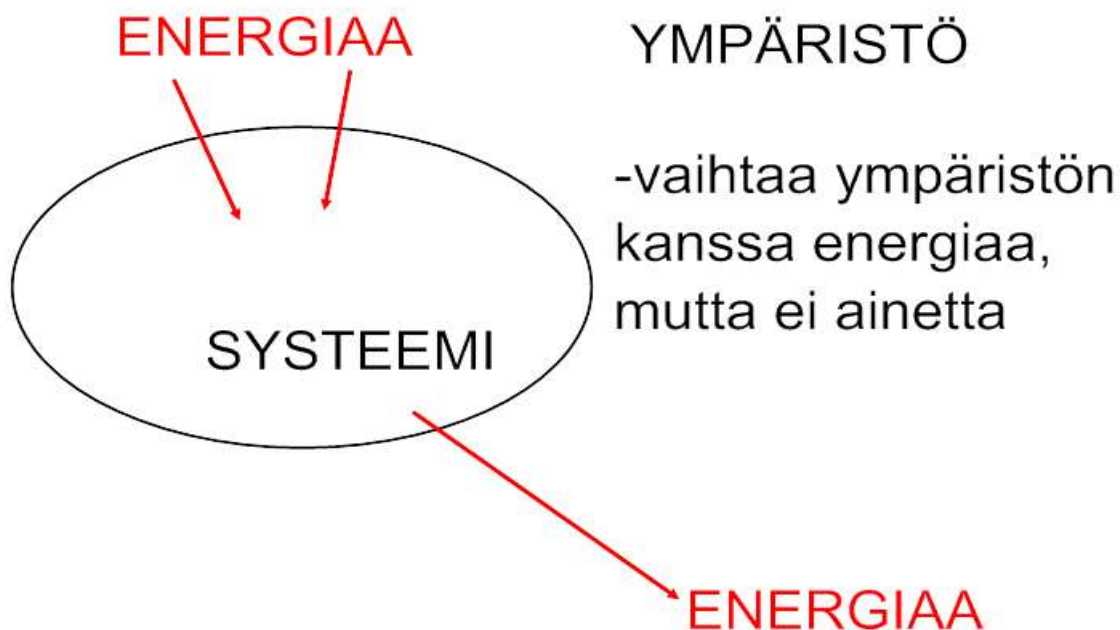
- lämpötila  $T = \text{Temperature}$
- paine  $p = \text{pressure}$
- tilavuus  $V = \text{Volume}$
- ainemäärä  $n, [n] = 1 \text{ mol (mooli)}$

Erilaisia termodynaamisia systeemejä:

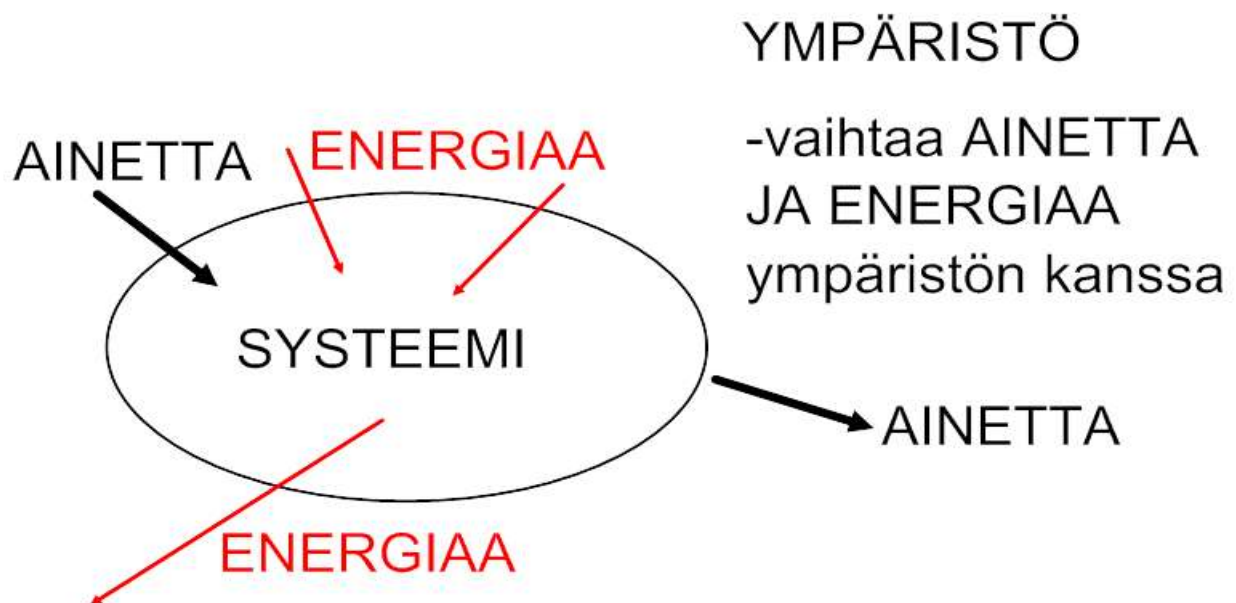
## ERISTETTY SYSTEEMI



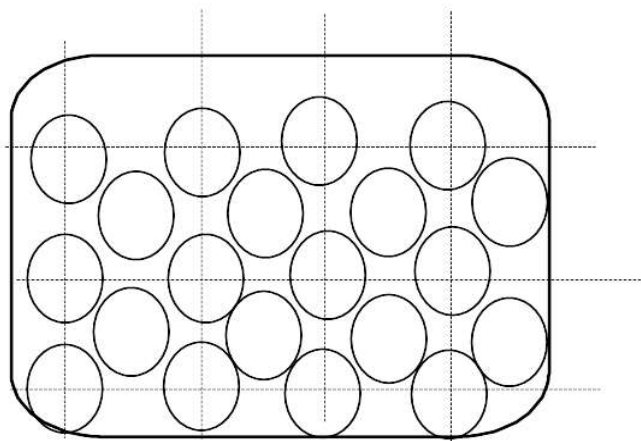
## SULJETTU SYSTEEMI



# AVOIN SYSTEEMI

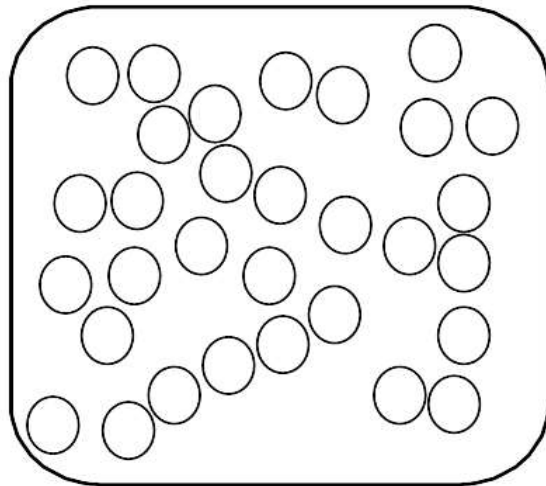


## KIINTEÄ (KITEINEN) AINE



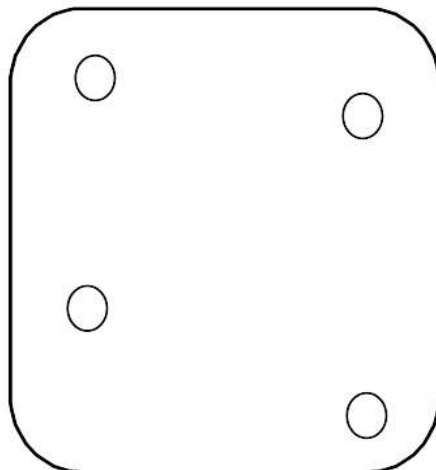
- rakenneosat ovat lähekkäin
- rakenteella on järjestys

## NESTE



- rakenneosat lähekkäin
- rakenteella ei ole järjestystä

## KAASU



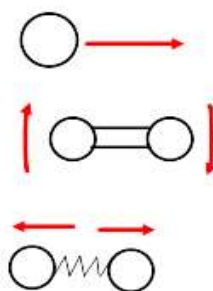
- harvaa ainetta
- rakenneosilla ei ole vuorovaikutusta eikä järjestystä

## Sisäenergia

Sisäenergia  $U$  = lämpöliikkeen liike-energioiden ja parivuorovaikutuksiin liittyvien potentiaalienergioiden summa

Liike-energia voi liittyä

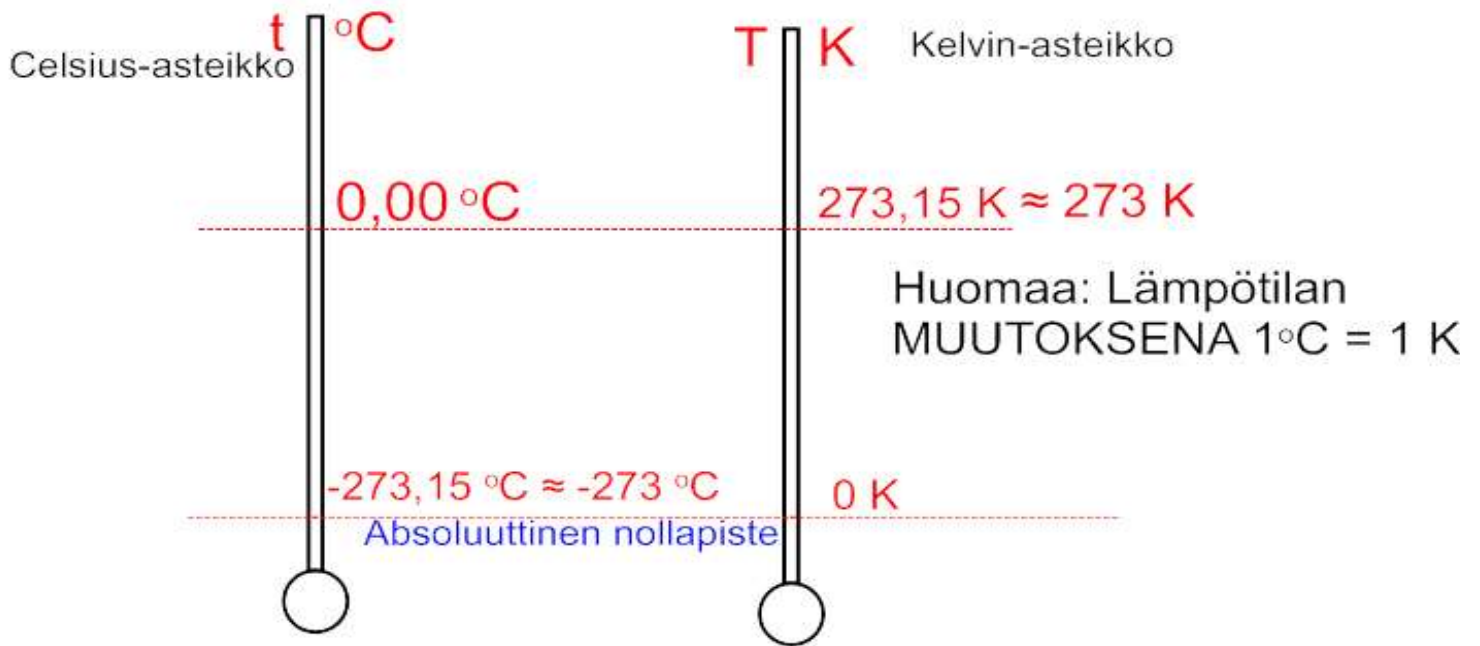
- etenevään liikkeeseen
- pyörimisliikkeeseen
- värähdysliikkeeseen



## Lämpötila

- kuvaa aineen rakenneosien KESKIMÄÄRÄISTÄ LIIKE-ENERGIAA
- lämpötilalla on alaraja (ABSOLUUTTINEN NOLLAPISTE = MIKÄÄN EI LIIKU), mutta...
- ylärajaa ei ole

## Lämpötila-asteikot:



Kelvin-asteikko on SUORAAN VERRANNOLLINEN rakenneosien keskimääräiseen liike-energiaan.

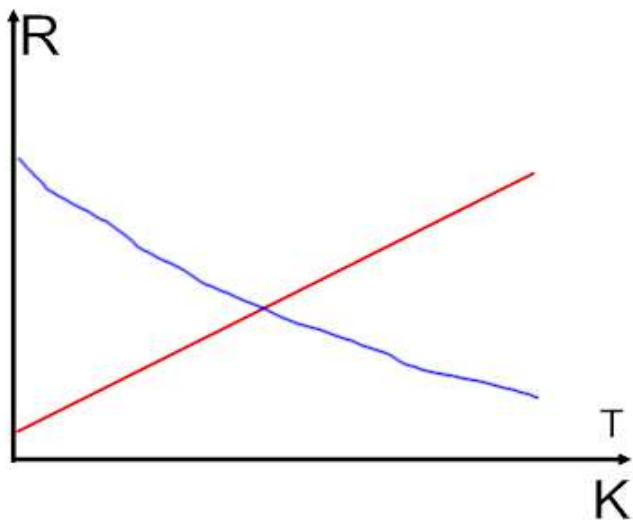
## Lämpötilan mittaamiseen liittyviä ilmiöitä:

1. Nesteiden ja kaasujen lämpölaajuminen
2. Kiinteän aineen lämpölaajeneminen (kaksoismetallijousi)





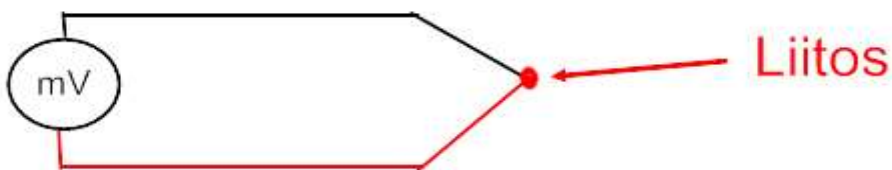
### 3. Materiaalien sähkönjohtavuus tai ”sähkövastus” eli RESISTANSSI R riippuu lämpötilasta:



PTC-vastukset (metalleja)  
Positive Temperature Coefficient

NTC -vastukset (puolijohteita)  
Negative Temperature Coefficient

### 4. Lämpösähköpari eli TERMOELEMENTTI



- kahden ERI metallin liitos antaa lämpötilasta riippuvan jännitteen
- jännite on PIENI

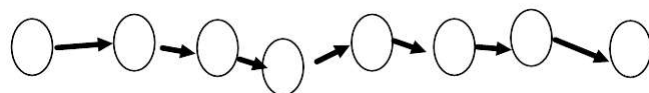
## 5. Optinen lämpötilan mittaus

- kappale lähettää lämpösäteilyä, jonka aallonpituusjakaumasta ("väristä") lämpötila voidaan selvittää

## 2 Energian siirtyminen johtumalla, kuljettumalla ja säteilyinä

### Johtuminen (tarvitaan VÄLIAINETTA)

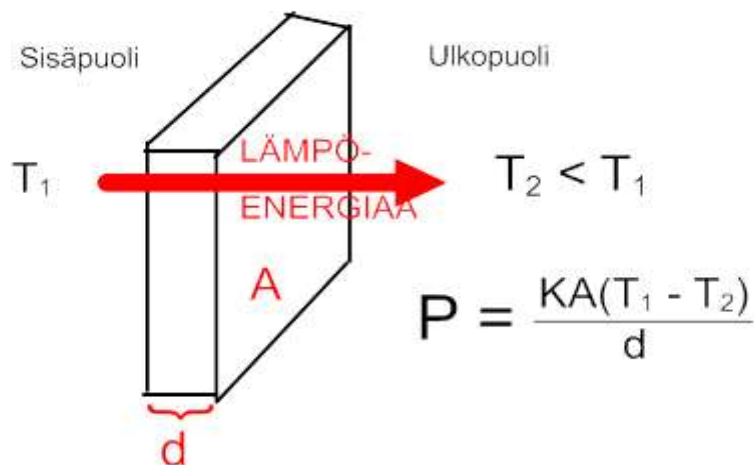
- atomitason ilmiö: lähinaapurit saatetaan liikkeelle:



- johtuminen riippuu rakenneosien TIHEYDESTÄ ja VUOROVAIKUTUKSESTA

- kiinteät aineet, mm. metallit, johtavat lämpöä hyvin
- kaasut johtavat lämpöä huonosti
- TYHJIÖSSÄ lämpöä ei siirry johtumalla

Johtumalla siirtyvä lämpöteho voidaan arvioida lämpötilaeron avulla:



$P =$  lämpöteho,  $[P] = 1\text{W}$

$K =$  seinän lämmönjohtavuus,  
 $[K] = 1\text{W/mK}$  (riippuu materiaalista)

$A =$  seinän pinta-ala,  $[A] = 1\text{m}^2$

$T_1 - T_2 =$  lämpötilaero,  $[T_1 - T_2] = 1\text{K}$   
 $d =$  seinämän paksuus,  $[d] = 1\text{m}$

ESIMERKKI (Talon lämmitystehon arviointi)

$K = 0,040 \text{ W/mK}$  (vuorivilla)

$A = 200 \text{ m}^2$  (seinien pinta-ala)

$d = 0,20 \text{ m}$  (seinän paksuus)

$T_1 - T_2 = 50 \text{ K}$  (lämpötilaero)

$$P = \frac{KA(T_1 - T_2)}{d} = \frac{0,040\text{W/m}\cdot\cancel{\text{K}}\cdot 200\cancel{\text{m}^2}\cdot 50\cancel{\text{K}}}{0,20\cancel{\text{m}}}$$
$$= 2000 \text{ W} = \underline{2,0 \text{ kW}}.$$

## **Lämmön kuljetus (KONVEKTIO)**

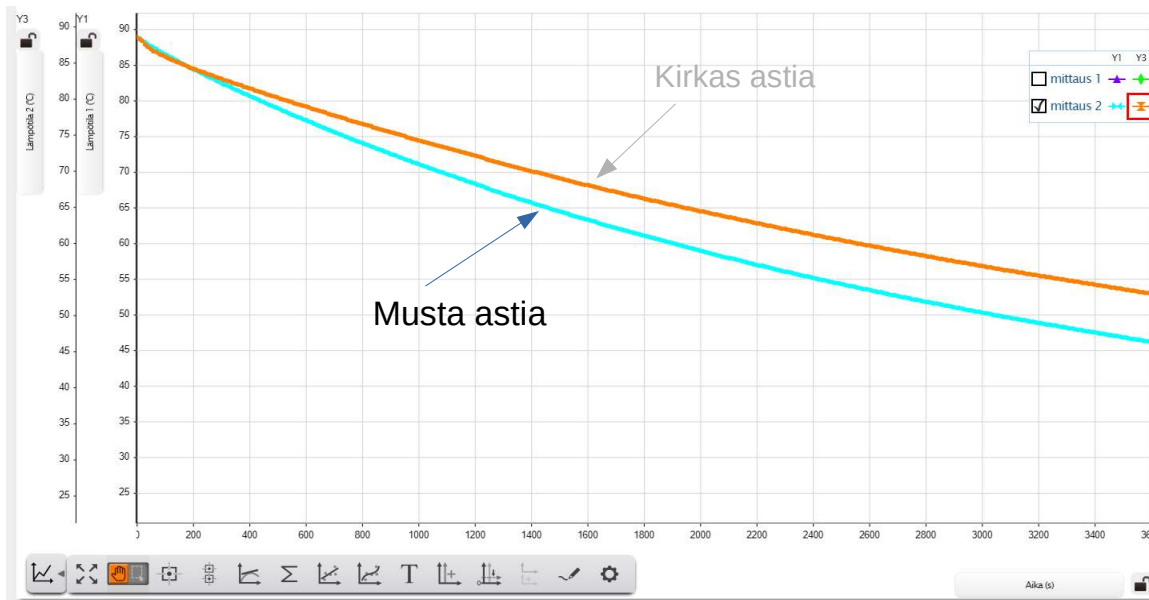
IDEA: Lämpötilaerot aiheuttavat nesteissä ja kaasuissa paine- tai tiheyseroja.

VÄLIAINE LÄHTEE LIIKKEELLE ja lämpö siirtyy virtaavan väliaineen mukana.

## **Lämpösäteily**

- valon kaltaista säteilyä, joka havaitaan tuntoaistin avulla
- lämpösäteily ei tarvitse etenemiseensä väliainetta eli se voi edetä myös tyhjiössä

Tumma esine on paremmin säteilytasa-painossa ympäristön kanssa kuin kirkas esine; kuuma vesi jäähtyy tummapintaisessa astiassa nopeammin.



### 3 Lämpötila vaikuttaa aineen laajuuteen

#### Pituuden lämpölaajeneminen

- kuvaa järkevästi KIINTEÄN AINEEN käyttäytymistä
- kiinteästä aineesta valmistettu esine SÄILYTTÄÄ MUOTONSA lämpötilan muuttuessa

Pituuden muutos

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta T$$

$\Delta l$  = pituuden muutos,  $[\Delta l] = 1\text{m}$

$\alpha$  = pituuden lämpötilakerroin (riippuu materiaalista),  
 $1/\text{K}$  tai  $[\alpha] = 1/^\circ\text{C}$

$l_0$  = esineen alkuperäinen pituus,  $[l_0] = 1\text{m}$

$\Delta T$  = lämpötilan muutos,  $[\Delta T] = 1\text{K}$  tai  $[\Delta T] = 1^\circ\text{C}$

## Tilavuuden lämpölaajeneminen

- kuvaa erityisesti NESTEIDEN JA KAASUJEN käyttäytymistä lämpötilan muuttuessa
- kaasujen lämpölaajenemista on järkevää tarkastella ainoastaan VAKIOPAINEESSA

Tilavuuden muutos  $\Delta V = \gamma V_0 \Delta T$

$\Delta V$  = tilavuuden muutos,  $[\Delta V] = 1\text{m}^3$

$\gamma$  = tilavuuden lämpötilakerroin (riippuu aineesta),  $[\gamma] = 1/\text{K}$  tai  $[\gamma] = 1/^\circ\text{C}$

$V_0$  = alkuperäinen tilavuus,  $[V_0] = 1\text{m}^3$

$\Delta T$  = lämpötilan muutos,  $[\Delta T] = 1\text{K}$  tai  $[\Delta T]=1^\circ\text{C}$

Lämpötilakertoimien suuruusluokka:

Kiinteä aine:  $\alpha \approx 10^{-5} 1/\text{K}$

Nesteet:  $\gamma \approx 10^{-3} 1/\text{K}$

Kaasut vakiopaineessa:

$$\gamma \approx \frac{1}{273\text{K}} \approx 4 \cdot 10^{-3} 1/\text{K}$$

K  
A  
S  
V  
A  
A

Rakenneseosien väliset voimat ovat heikompia.



## 4 Aineet sitovat ja luovuttavat energiaa

### Lämpökapasiteetti

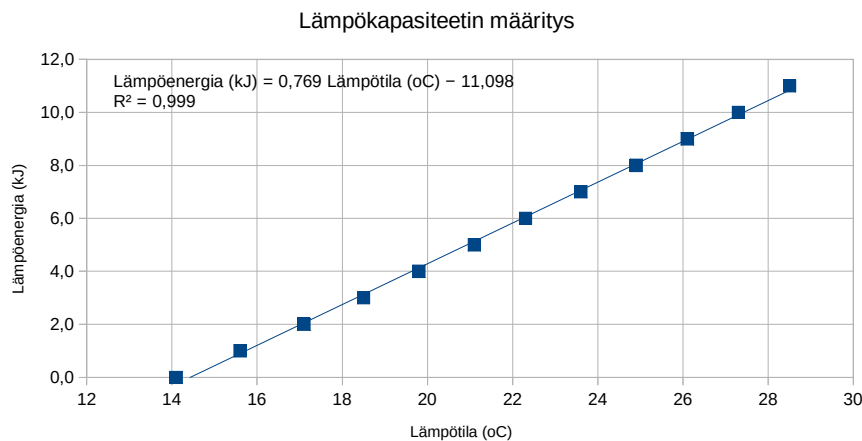
Tutkimus: Vesiastian lämpökapasiteetti

Lämmitysteho  $P = 16,7 \text{ W} = 16,7 \text{ J/s}$ .

Yhdessä minuutissa syötetty lämpöenergia

$Q = P \cdot t = 16,7 \text{ J/s} \cdot 60 \text{ s} = 1002 \text{ J} \approx 1,0 \text{ kJ}$ .

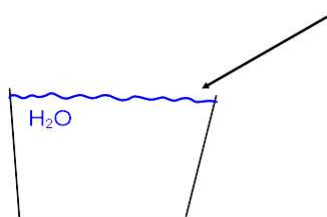
t(min)	T(°C)	Q(kJ)
0,0	14,1	0,0
1,0	15,6	1,0
2,0	17,1	2,0
3,0	18,5	3,0
4,0	19,8	4,0
5,0	21,1	5,0
6,0	22,3	6,0
7,0	23,6	7,0
8,0	24,9	8,0
9,0	26,1	9,0
10,0	27,3	10,0
11,0	28,5	11,0



Systemin lämpökapasiteetti on kuvaajan fysikaalinen kulmakerroin, ts.

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \approx 0,769 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{C}} \approx 0,77 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{C}}.$$

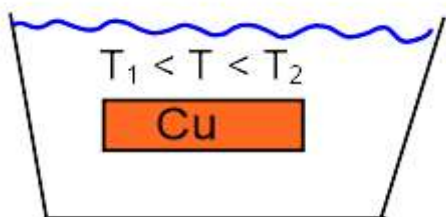
Kuparin tutkimus:



$m_1 = 0,137 \text{ kg}$   
 $T_1 = 15,67 \text{ }^\circ\text{C}$



$m_2 = 0,137 \text{ kg}$   
 $T_2 = +100,0 \text{ }^\circ\text{C}$



Loppulämpötila =  $T$ ,  $T_1 < T < T_2$

Mitattu loppulämpötila  
 $T = 25,78 \text{ }^\circ\text{C}$

# Teoreettisen loppulämpötilan laskenta

## Tietyn aineen OMINAISLÄMPÖKAPASITEETTI

*pieni kirjain*

$$c = \frac{C}{m} = \frac{\Delta Q}{\Delta T \cdot m} \Rightarrow \boxed{\Delta Q = cm\Delta T}$$

*c riippuu aineesta*

$$[c] = \frac{[\Delta Q]}{[m] \cdot [\Delta T]} = \frac{1\text{J}}{1\text{kg} \cdot 1^\circ\text{C}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Lasketaan loppulämpötila T:

1. Vesi lämpenee:  $T_1 \rightarrow T$

Lämpöenergian muutos

$$\Delta Q_1 = c_1 m_1 \Delta T_1 = c_1 m_1 (T - T_1) > 0$$

2. Kuparikappale jäähtyy:  $T \leftarrow T_2$

Vastaava lämpöenergian muutos

$$\Delta Q_2 = c_2 m_2 \Delta T_2 = c_2 m_2 (T_2 - T) > 0$$

Energian säilymislaki:  $\Delta Q_1 = \Delta Q_2$  eli

Lämpöä      Jäähdytys

$$c_1 m_1 (T - T_1) = c_2 m_2 (T_2 - T)$$

$$c_1 m_1 T - c_1 m_1 T_1 = c_2 m_2 T_2 - c_2 m_2 T$$

$$c_1 m_1 T + c_2 m_2 T = c_1 m_1 T_1 + c_2 m_2 T_2$$

$$(c_1 m_1 + c_2 m_2) T = c_1 m_1 T_1 + c_2 m_2 T_2$$

$$T = \frac{c_1 m_1 T_1 + c_2 m_2 T_2}{c_1 m_1 + c_2 m_2} = \dots \approx 22,80^\circ \text{C}.$$

$$m_1 = 0,137 \text{ kg}, \quad T_1 = 15,67^\circ \text{C}$$

$$m_2 = 0,137 \text{ kg}, \quad T_2 = 100^\circ \text{C}$$

$$c_1 = 4190 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$$

$$c_2 = 387 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$$

Mitattu loppulämpötila  $T = 21,86^\circ \text{C}$ .

Sijoita ja laske:

Ratkaistaan Geogebraan symbolisen laskennan (CAS) toiminnolla:

1 Ratkaise  $(c_1 \cdot m_1 \cdot (T - T_1) = c_2 \cdot m_2 \cdot (T_2 - T), T)$

→  $\left\{ T = \frac{T_1 c_1 m_1 + T_2 c_2 m_2}{c_1 m_1 + c_2 m_2} \right\}$

2 Sijoita,  
 $T=T, T_1=15.67, T_2=100.00, c_1=4190, c_2=387, m_1=0.137, m_2=0.137$ :

$\left\{ T = \frac{15.670 \cdot 4190.0 \cdot 0.13700 + 100.00 \cdot 387.00 \cdot 0.13700}{4190.0 \cdot 0.13700 + 387.00 \cdot 0.13700} \right\}$

3  $\left\{ T = \frac{15.67 \cdot 4190 \cdot 0.137 + 100 \cdot 387 \cdot 0.137}{4190 \cdot 0.137 + 387 \cdot 0.137} \right\}$

Ratkaise Numeerisesti:  $\{ T = 22.800 \}$

1 Ratkaise( $c_1 \cdot m_1 \cdot (T - T_1) = c_2 \cdot m_2 \cdot (T_2 - T)$ ,  $T$ )

2  $\rightarrow \left\{ T = \frac{T_1 c_1 m_1 + T_2 c_2 m_2}{c_1 m_1 + c_2 m_2} \right\}$

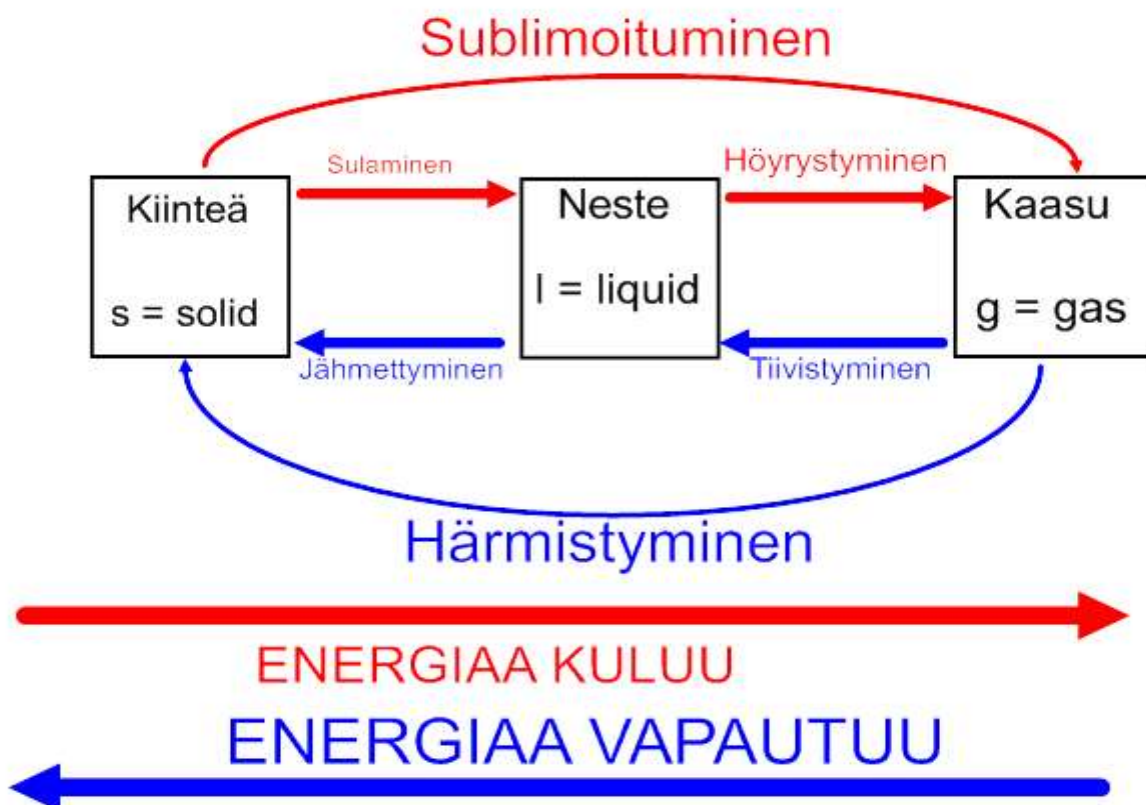
\$1

2 Sijoita,  
 $T=T, T_1=15.67, T_2=100.00, c_1=4190, c_2=387, m_1=0.137, m_2=0.137$ :

3  $\left\{ T = \frac{15.670 \cdot 4190.0 \cdot 0.13700 + 100.00 \cdot 387.00 \cdot 0.13700}{4190.0 \cdot 0.13700 + 387.00 \cdot 0.13700} \right\}$

RatkaiseNumeerisesti:  $\{T = 22.800\}$

## 5 Aine voi esiintyä eri olomuodoissa

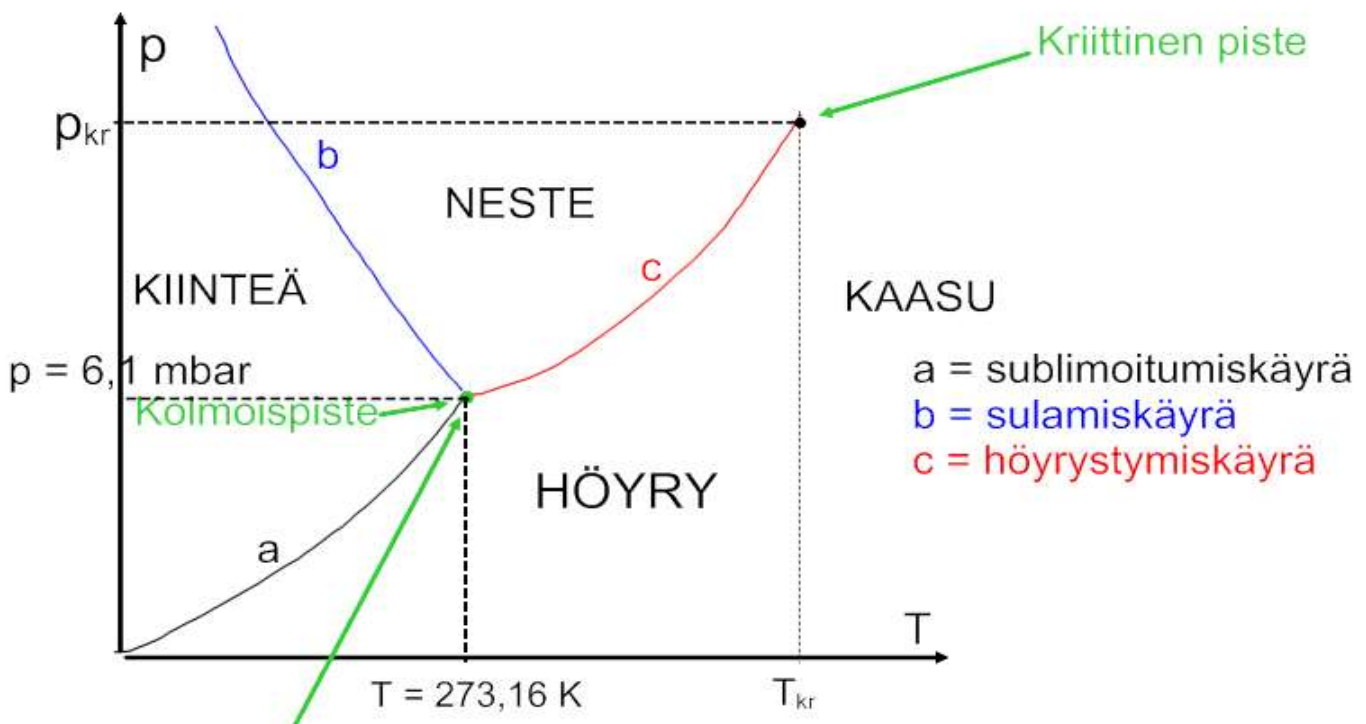


# Faasikaavio

IDEA: Olomuodon muutokset riippuvat LÄMPÖTILASTA JA PAINEESTA.

Faasi = "Fysikaalisesti ja kemiallisesti yhtenäinen aineen osa-alue."

## Veden faasikaavio:



**KOLMOISPISTEESSÄ** kaikki kolme olomuotoa ovat tasapainossa.

Kun höyryn lämpötila on suurempi kuin ky-seisen aineen KRIITTINEN LÄMPÖTILA ( $T_{kr}$ ), rakenneosien liike-energia on suurempi kuin niiden keskinäiseen vuorovaikutukseen liittyvä potentiaalienergia. Silloin ainetta ei enää saada nesteytymään pelkästään painetta kasvattamalla.

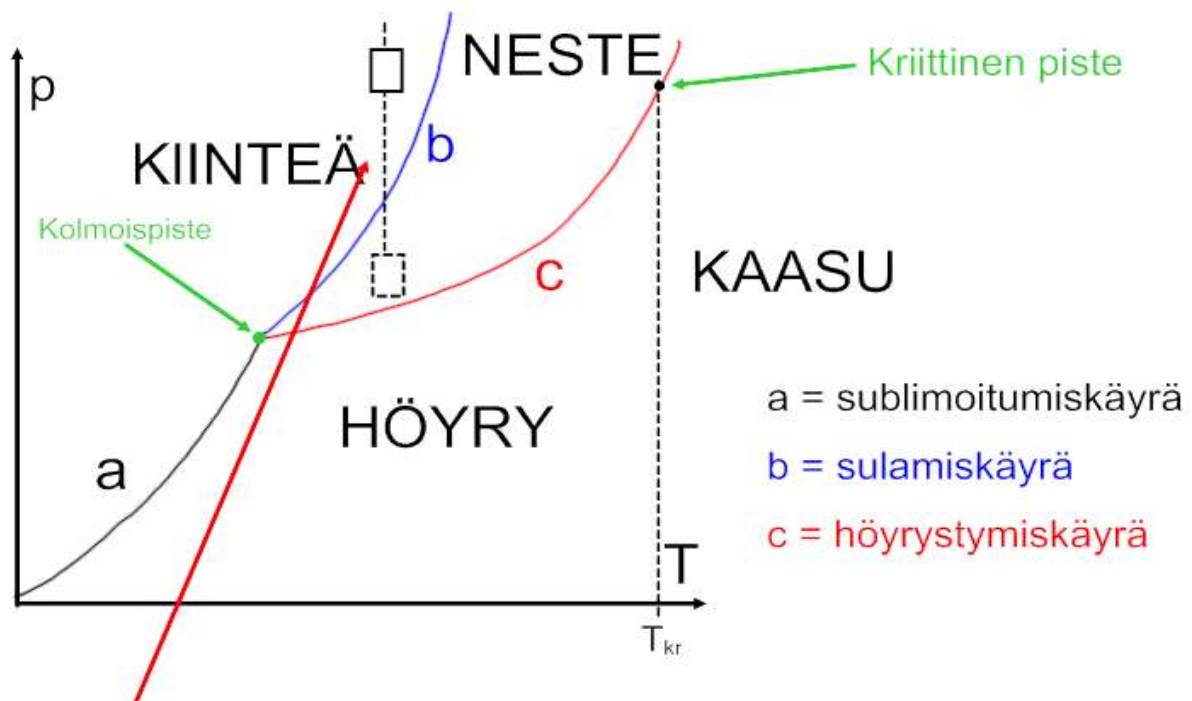
Höyrystymiskäyrän avulla löydetään kriittistä lämpötilaa vastaava KRIITTINEN PAINE  $p_{kr}$ .

Piste ( $T_{kr}$ ,  $p_{kr}$ ) on KRIITTINEN PISTE.

Kun  $T < T_{kr}$ , harva faasi on HÖYRYÄ.

Kun  $T > T_{kr}$ , kyseessä on KAASU.

## Hiilidioksidin faasikaavio:



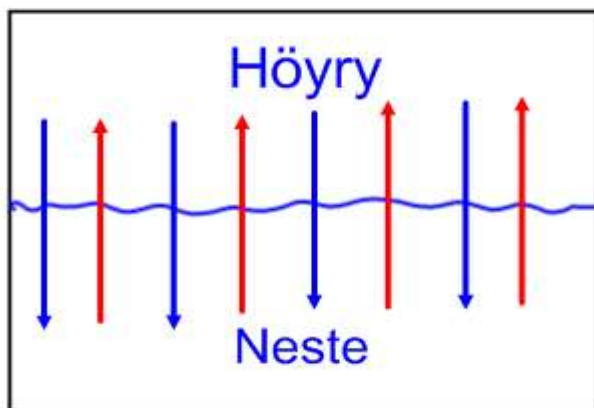
**Nestemäinen hiilidioksidi JÄHMETTYY, kun painetta kasvatetaan.**

# Höyrystyminen

**HAIHTUMINEN** = molekyyliä irtoaa nesteen pinnalta ("nopeimmat karkaavat").  
Haihtumista tapahtuu kaikissa lämpö-tiloissa.

**KIEHUMINEN** = höyrykuplia muodostuu myös nesteen sisällä. Kiehuminen tapahtuu tietyssä lämpötilassa, joka riippuu **PAINEESTA**.

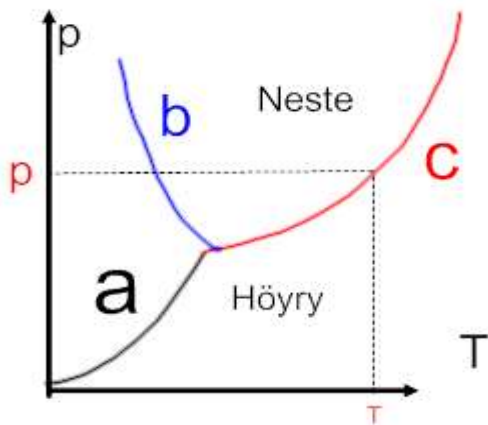
## Kylläinen höyry:



↑ Höyrystyminen ja  
↓ tiivistyminen

ovat dynaamisessa tasapainossa.





Höyrystymiskäyrältä  
(c) voidaan lukea  
tiettyä lämpötilaa  
vastaava KYLLÄISEN  
HÖYRYN PAINE  $p$ .

Jokainen neste kiehuu siinä lämpötilassa, jossa sen kylläisen höyryn paine on ulkoisen paineen suuruinen.

Ks. veden kylläisen höyryn paine MAOL-taulukosta

## Ilmankosteus

Käsitteitä:

ABSOLUUTTINEN KOSTEUS =  $x$  = ilman vesihöyrypitoisuus,  $[x] = 1\text{g/m}^3$

MAKSIMIKOSTEUS =  $x_m$  = ilman suurin mahdollinen vesihöyrypitoisuus (vastaa kylläisen vesihöyryn tiheyttä, taulukko löytyy MAOLista)

# SUHTEELLINEN KOSTEUS

$$\varphi = \frac{x}{x_m}$$

"fii"

KASTEPISTE = se LÄMPÖTILA, jossa absoluuttinen kosteus = maksimikosteus eli lämpötila laskee, kunnes kastepisteessä vesihöyry muuttuu kylläiseksi.

Esimerkki: Jos absoluuttinen kosteus  $x = 10,0 \text{ g/m}^3$ , vastaava kastepiste on taulukkokirjan mukaan  $+11 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## ESIMERKKI

a)  $\varphi = 0,50$   
 $T = +21 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  
 $x_m = 18,33 \text{ g/m}^3$   
 $x = ?$

$$\varphi = \frac{x}{x_m}, \text{ joten } x = \varphi \cdot x_m = 0,50 \cdot 18,33 \text{ g/m}^3 \\ \approx 9,2 \text{ g/m}^3$$

b) Mitä tapahtuu, jos lämpötila laskee  $+4 \text{ }^\circ\text{C}$ :een? Silloin  $x_m \approx 6,36 \text{ g/m}^3 < x$  eli VESIHÖYRY ALKAA TIIVISTYÄ.

Kylläisen vesihöyryn paine ja tiheys:

t(°C)	p(mbar)	x <sub>m</sub> (g/m <sup>3</sup> )		t(°C)	p(mbar)	x <sub>m</sub> (g/m <sup>3</sup> )
1	6,57	5,19		16	18,17	13,63
2	7,06	5,56		17	19,36	14,47
3	7,58	5,95		18	20,63	15,37
4	8,13	6,36		19	21,96	16,3
5	8,72	6,8		20	23,37	17,29
6	9,35	7,26		21	24,86	18,33
7	10,02	7,75		22	26,43	19,42
8	10,73	8,27		23	28,08	20,57
9	11,48	8,82		24	29,82	21,77
10	12,28	9,41		25	31,66	23,04
11	13,12	10,01		26	33,60	24,36
12	14,02	10,66		27	35,64	25,76
13	14,97	11,34		28	37,78	27,22
14	15,98	12,07		29	40,04	28,75
15	17,04	12,83		30	42,41	30,36

## 6 Olomuodonmuutoksissa sitoutuu tai vapautuu energiaa

### Ominaissulamislämpö

$$\text{Ominaissulamislämpö} = \frac{\text{Sulamiseen tarvittava lämpöenergia}}{\text{Sulatettavan aineen massa}}$$

Kaava:  $s = \frac{Q}{m} \Rightarrow Q = sm$

Olomuodon muutoksen aikana lämpötila ei muutu.

$$\text{Yksiköt: } [s] = \frac{[Q]}{[m]} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

## Vastaavasti

$$\text{Ominaishöyrystymislämpö} = \frac{\text{Höyrystämiseen tarvittava energia}}{\text{Höyrystettävän aineen massa}}$$

Kaava:  $r = \frac{Q}{m}$   $\Rightarrow Q = rm$   
Lämpötila ei muutu!

$$\text{Yksiköt: } [r] = \frac{[Q]}{[m]} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

## Jäiden sulattaminen

1. Punnitaan kalorimetriin kuumaa vettä

- massa  $m_2 = 0,102 \text{ kg}$
- lämpötila  $T_2 = 82,0 \text{ °C}$

2. Lisätään joukkoon sulamislämpötilassa olevia jäitä

- $m_1 = 0,086 \text{ kg}$
- $T_1 = 0,0 \text{ °C}$

3. Mitataan loppulämpötila  $T = 12,4 \text{ °C}$ , kun kaikki jäät ovat sulaneet.

## Teoreettinen tarkastelu:

1. Jäät sulavat vakiolämpötilassa  $T_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ .  
Tarvittava lämpöenergia  $Q_1 = sm_1$ .
2. Jäistä muodostunut vesi lämpenee:  $T_1 \rightarrow T$ .  
Tarvittava lämpöenergia  
 $Q_2 = cm_1\Delta T_1 = cm_1(T - T_1) > 0$ .
3. Kuuma vesi jäähtyy:  $T \leftarrow \underbrace{\quad}_{>0}$  vapautuva  
lämpöenergia  $Q_3 = cm_2\Delta T_2 = cm_2(T_2 - T) < 0$ .

$\underbrace{\quad}_{>0}$

## Energian säilymislaki:

$$\underbrace{Q_1}_{\text{Kuluttaa}} + \underbrace{Q_2}_{\text{Kuluttaa}} = \underbrace{Q_3}_{\text{Luovuttaa}}, \text{ ts.}$$

$$\begin{aligned} s &= 333000 \text{ J/kg} \\ c &= 4190 \text{ J/kgK} \\ T_1 &= 0,0 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_2 &= 82,0 \text{ }^\circ\text{C} \\ m_1 &= 0,086 \text{ kg} \\ m_2 &= 0,102 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$sm_1 + cm_1(T - T_1) = cm_2(T_2 - T).$$

Ratkaistaan teoreettinen loppulämpötila:

$$sm_1 + cm_1T - cm_1T_1 = cm_2T_2 - cm_2T$$

$$cm_1T + cm_2T = cm_1T_1 + cm_2T_2 - sm_1$$

$$(cm_1 + cm_2)T = cm_1T_1 + cm_2T_2 - sm_1$$

$$T = \frac{cm_1T_1 + cm_2T_2 - sm_1}{cm_1 + cm_2} = \dots \approx 8,13 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Kokeellinen tulos:  $T = 12,4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## Ratkaisu Geogebra:

Ratkaise(s  $m_1 + c m_1 (T - T_1) = c m_2 (T_2 - T)$ ,  $T$ )

1  $\rightarrow \left\{ T = \frac{T_1 c m_1 + T_2 c m_2 - m_1 s}{c m_1 + c m_2} \right\}$

\$1

2 Sijoita,  $T=T, T_1=0, T_2=82.0, c=4190, m_1=0.086, m_2=0.102, s=333000$ :

3  $\left\{ T = \frac{0.0000 \cdot 4190.0 \cdot 0.086000 + 82.000 \cdot 4190.0 \cdot 0.10200 - 0.08600 \cdot 333000}{4190.0 \cdot 0.086000 + 4190.0 \cdot 0.10200} \right\}$

RatkaiseNumeerisesti:  $\{T = 8.1338\}$

4

Mitattu 20.03.2023

Paineen yksikkö:

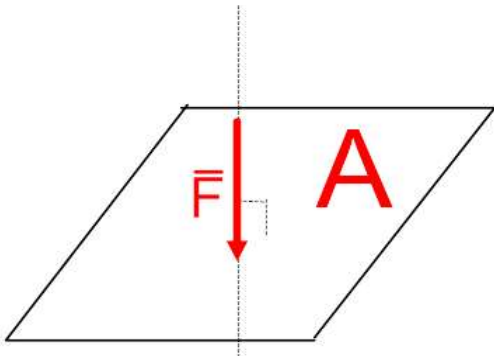
$$[p] = \frac{[F]}{[A]} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Pa} \quad (\text{pascal})$$

Muita yksiköitä:

$$1 \text{ baari} = 1 \text{ bar} = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}$$

# 7 Paine aiheutuu voimasta

Pinnan normaali



Paine määritellään kohtisuoran voiman ja tason pinta-alan avulla:

pressure

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

Normaali ilmanpaine

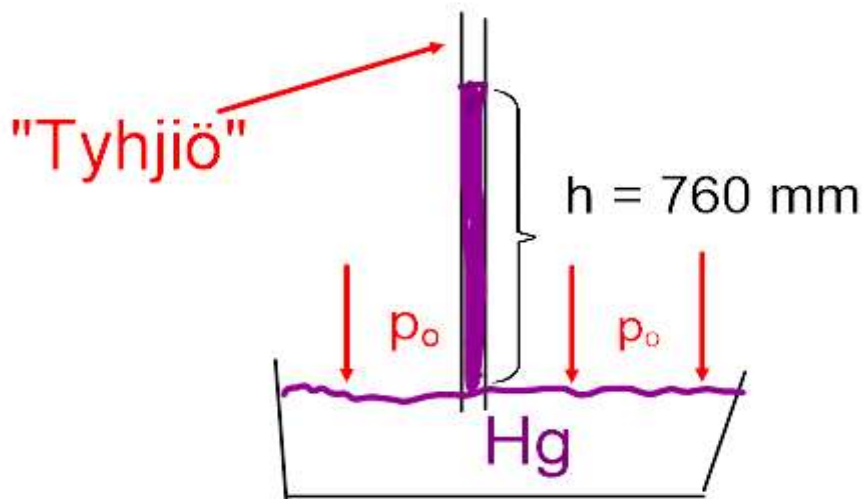
$$p_0 = 101325 \text{ Pa} \approx 1,013 \text{ bar} = 1013 \text{ mbar}$$

"elohopea-  
millimetri"

torri

$$\text{Toisaalta } p_0 = 760 \text{ mmHg} = 760 \text{ torr}$$

Ilmanpainetta mitattiin aluksi elohopeapillillä:



Normaalissa ilmanpaineessa elohopea kiipeää tyhjiöputkessa 760 mm nesteen pintaa korkeammalle.

## 8 Väliaineeseen kohdistuva paino aiheuttaa paineen

### Ilmanpaine

- aiheutuu ilman omasta painovoimasta
- pienenee kiivettäessä ilmakehässä ylöspäin
- pieneneminen ei ole tasaista, koska maan pinnan läheisyydessä ilma puristuu kokoon ja sen massatiheys on suurempi



Ennätykset:

Korkein ilmanpaine: 1066 mbar  
Helsinki 22.1.1907

Alin ilmanpaine: 940,0 mbar  
Rauma, Kuuskajaskari 27.2.1990

ks. [Sääennätyksiä](#)

## Hydrostaattinen paine

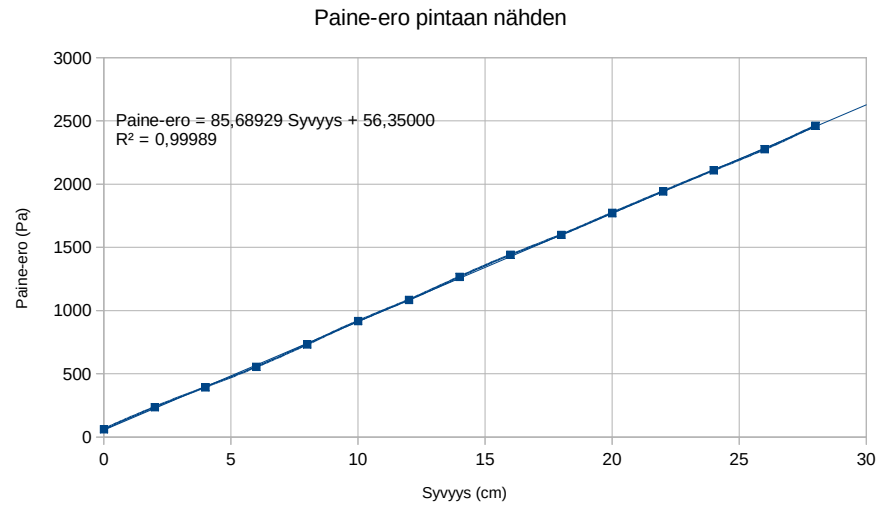
Tutkimus: Paine-eron riippuvuus neste-kerroksen paksuudesta

Merkitään:

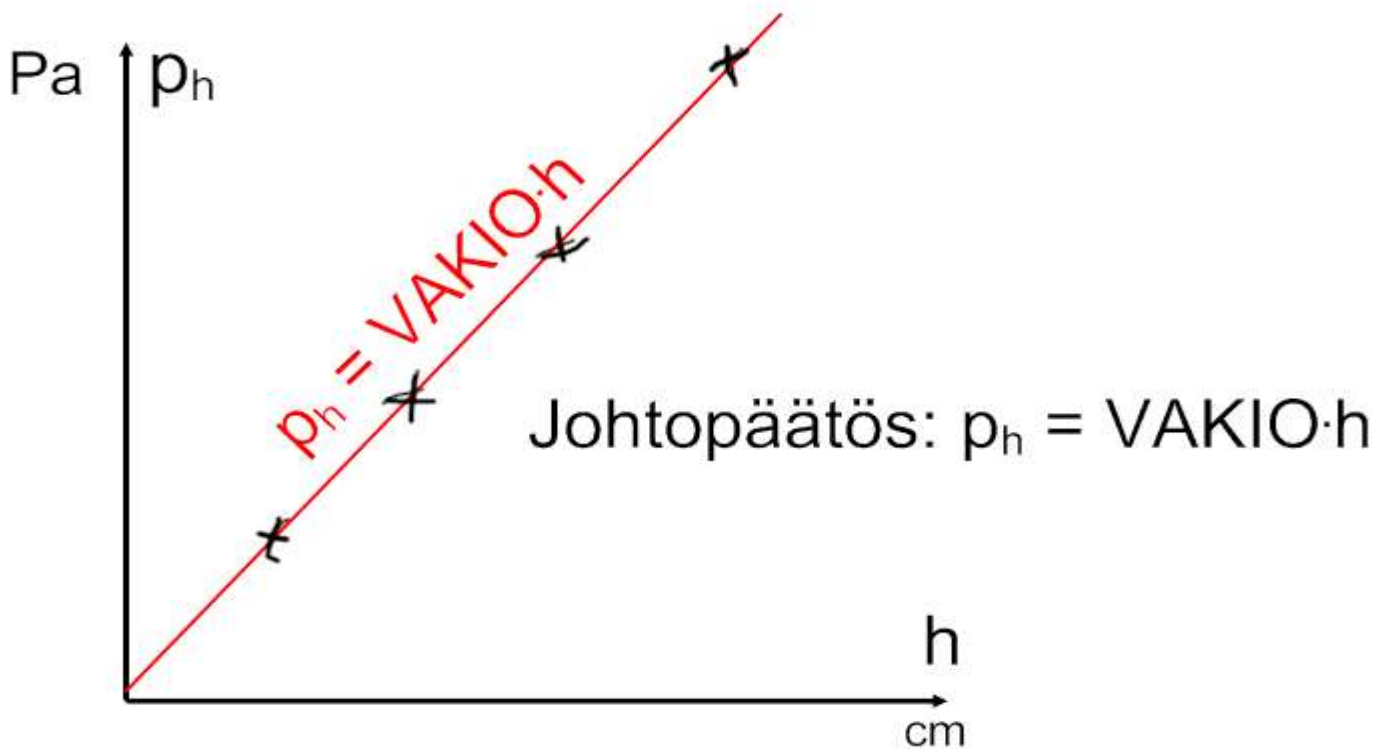
$h$  = nestekerroksen paksuus

$p_h$  = paine-ero pintaan nähden  
syvyydellä  $h$

h(cm)	$p_h$ (Pa)
0	62
2	236
4	394
6	554
8	732
10	916
12	1084
14	1266
16	1440
18	1599
20	1771
22	1942
24	2109
26	2275
28	2460



Mitattu 10.5.2022



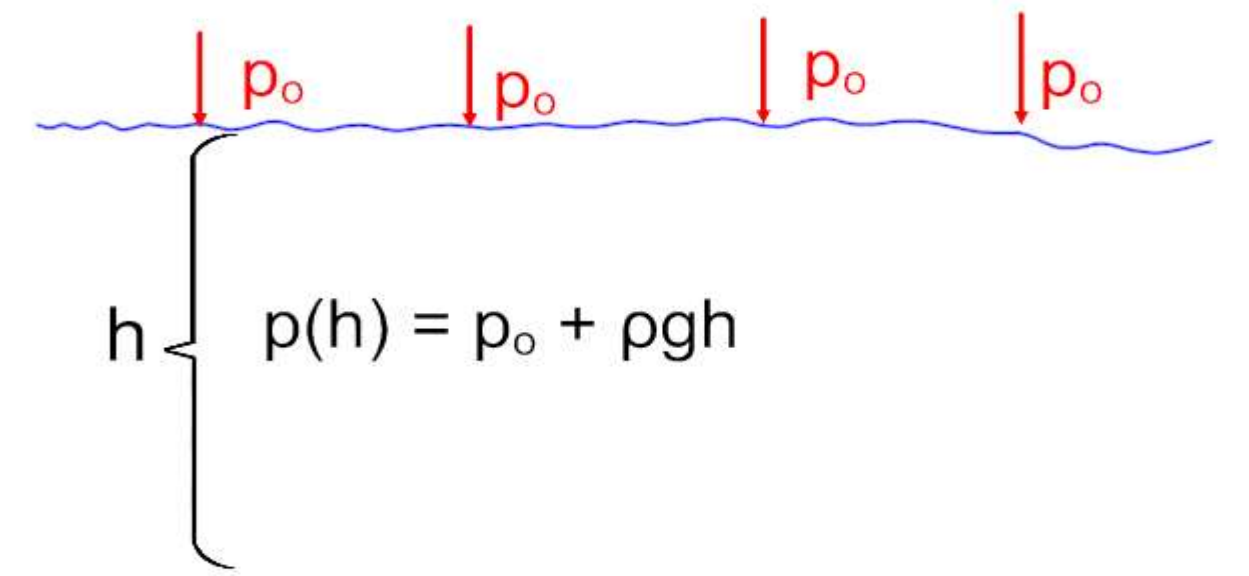
Teoreettisesti voidaan osoittaa, että

$$p_h = \rho g h \quad \text{MAOL s. 127}$$

$\rho$  = nesteen tiheys,  $[\rho] = 1 \text{ kg/m}^3$        $g$  =  
putoamiskiihtyvyyys  $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$

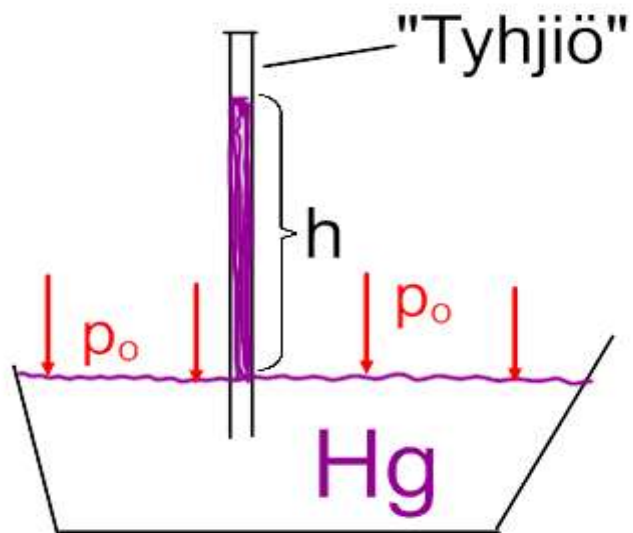
$h$  = nestekerroksen paksuus,  $[h] = 1 \text{ m}$

Ulkoinen ilmanpaine vaikuttaa myös nesteen pinnan alapuolella:



# Paineen mittaaminen

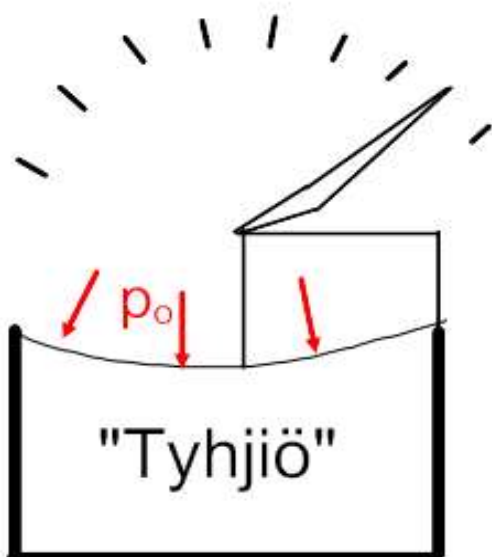
## 1. Elohopeabarometri



Kun  $p = p_o$ ,  $h = 760$  mm.  
Patsaan korkeus muuttuu  
LINEAARISESTI ilman-  
paineen muuttuessa.

$$p = \rho gh$$

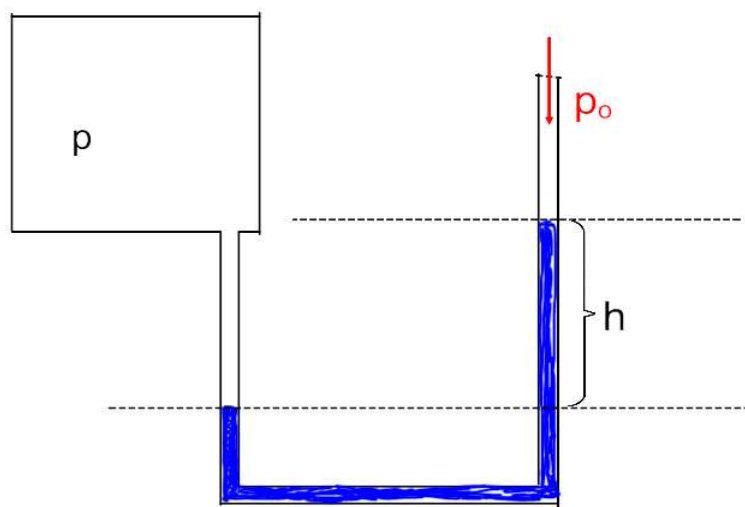
## 2. Rasiabarometri



Metallikotelon kansi  
painuu kasaan  
paineen kasvaessa.

### 3. Nestemanometrit

-käytetään PAINE-EROJEN mittaamiseen



Kumpi on suurempi, p vai  $p_0$  ?

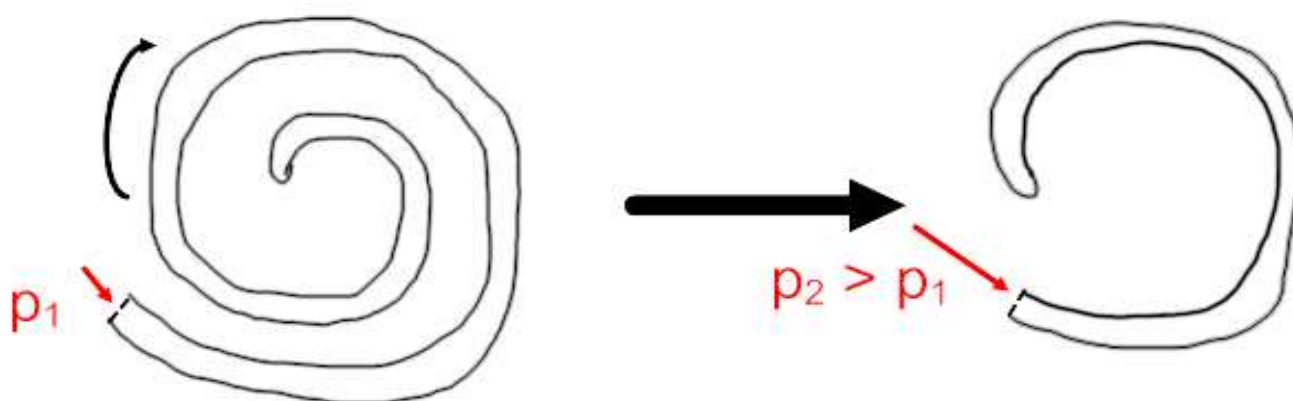
Tasapainoehto:

$$p = p_0 + \rho gh, \quad \rho = \text{nesteen tiheys}$$

### 4. Muodonmuutosmanometrit

-Bourdon-putki

-spiraaliputki kiertyy auki paineen kasvaessa:



## 5. Sähköiset paineanturit

- venymäliuska-anturit (taivutus aiheuttaa jännitteen)
- pietsosähköiset anturit (puristus aiheuttaa jännitteen)
- kapasitiiviset paineanturit (painetta mittaava kalvo on samalla kondensaattorin levy)

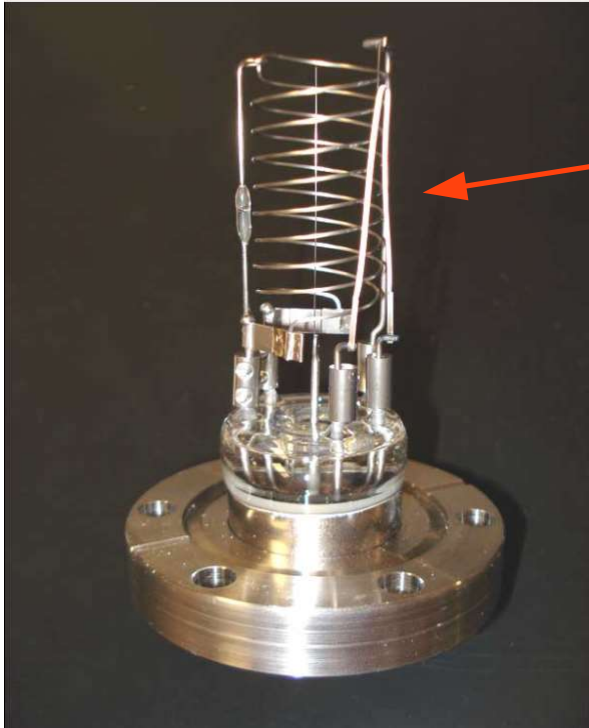
## 6. "Tyhjiön" eli hyvin pienen kaasunpaineen mittaaminen

-yleensä mitataan MOLEKYYLITIHEYTTÄ, koska paineen aiheuttamat voimat ovat liian pieniä

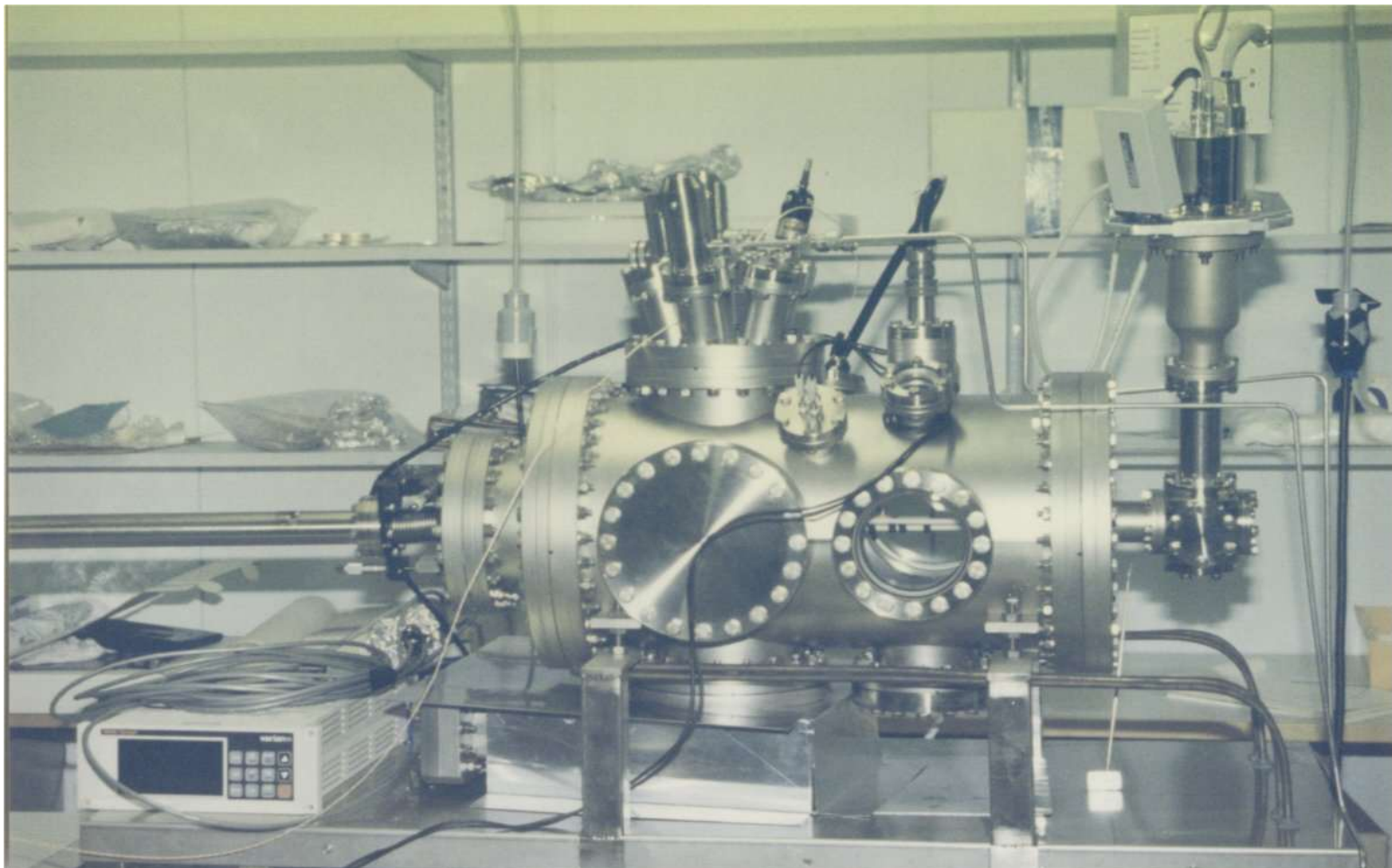
-mittaaminen voi perustua

- kaasun lämmönjohtavuuden mittaamiseen
- kaasun ionisointiin ja syntyvän sähkövirran mittaamiseen

# Tyhjiölaitteiden paineanturi (Bayard-Alpert -ionisaatioanturi)



Hehkuva metallilanka toimii samalla lamppuna...

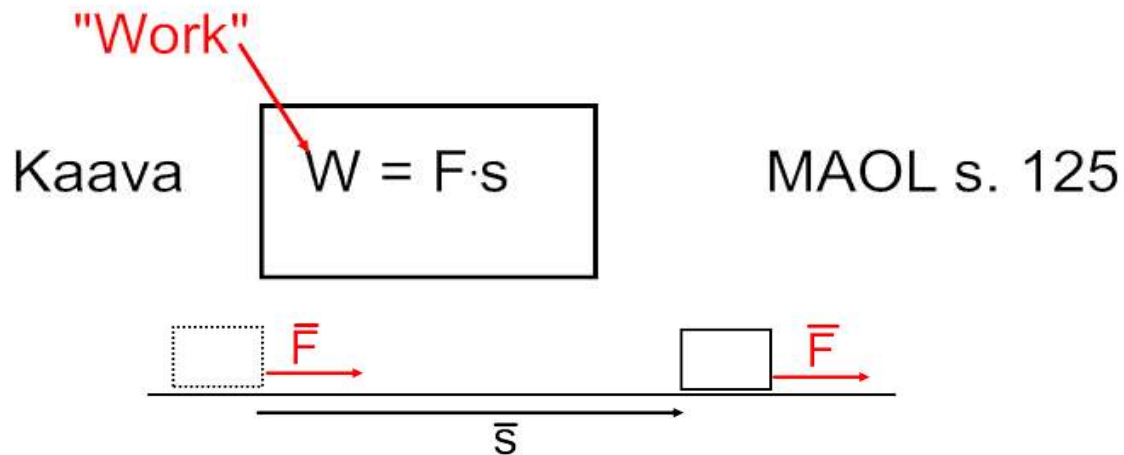


# 9 Mekaanisen energian ja lämpö-energian yhteys

## Fysikaalinen työ

Fysikaalinen työ = Voima·Siirtymä

Voiman on oltava siirtymän suuntainen.



Työn yksikkö:

$$[W] = [F] \cdot [s] = 1\text{N} \cdot 1\text{m} = 1\text{Nm} = 1\text{J (joule)}$$

Toisaalta

$$1\text{J} = 1\text{Nm} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = 1 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}.$$



# Mekaaninen energia

## Energian säilymlaki

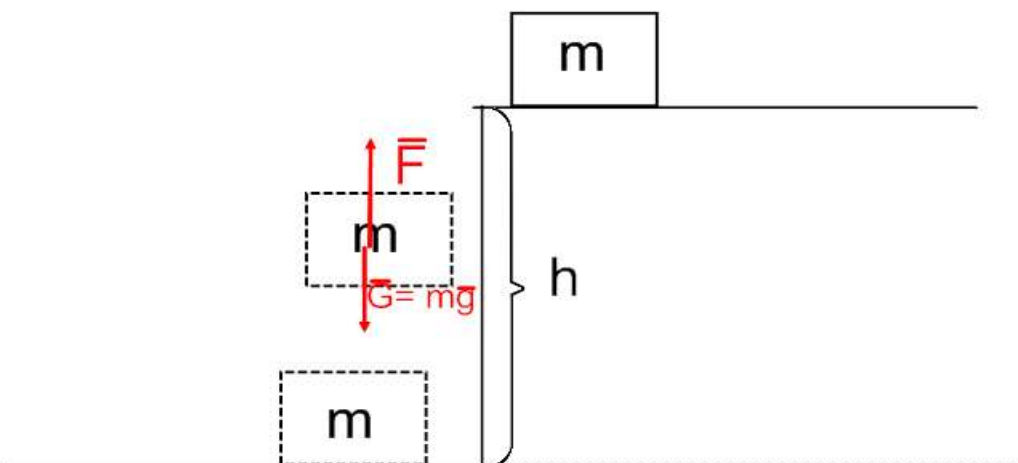
Eristetyn systeemin kokonaisenergia säilyy

- energiaa ei voi syntyä tyhjästä
- energia ei voi myöskään kadota
- energia voi MUUNTUA muodosta toiseen

## Potentiaalienergia

-riippuu kappaleen **PAIKASTA**

-tarkastellaan painovoiman potentiaalienergiaa eli NOSTOTYÖTÄ:



Tehty työ muuttuu potentiaalienergiaksi:

$$E_p = W = F \cdot s = mgh$$

Siis  $E_p = mgh$  MAOL s. 125

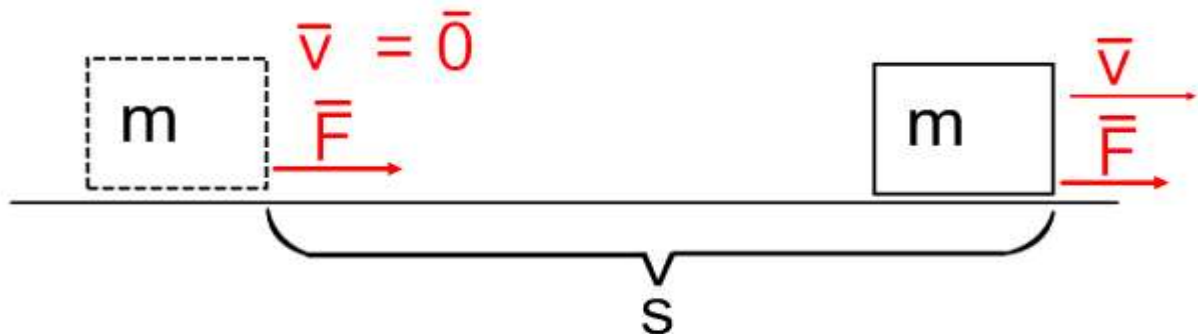
Potentiaalienergian yksikkö:

$$[E_p] = [m] \cdot [g] \cdot [h] = 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ m} = 1 \underbrace{\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}}_{\text{J}} = 1 \text{ J}, \text{OK}$$

## Liike-energia

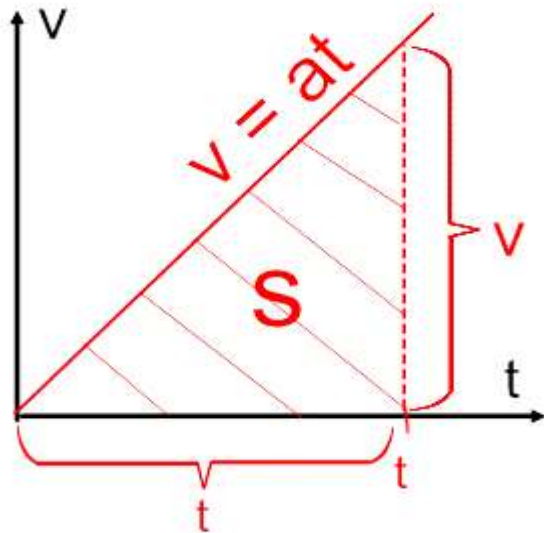
-riippuu kappaleen **NOPEUDESTA**

-tarkastellaan kiihdytystä:



Kappale, jonka massa =  $m$ , kiihdytetään levosta loppunopeuteen  $\bar{v}$  vakiovoimalla  $\bar{F}$ . Kiihdytysmatka on  $s$ .

Kyseessä on TASAISESTI KIIHTYVÄ LIIKE:



Kuljettu matka

$$s = \frac{t \cdot v}{2} = \frac{1}{2} vt$$

Tehty työ muuttuu liike-energiaksi:

Kineettinen energia, engl. Kinetic Energy

$$E_k = W = F \cdot s \quad | \quad F = ma, \quad s = \frac{1}{2} vt$$

$$= ma \cdot \frac{1}{2} vt \quad | \quad a = \frac{v}{t}$$

$$= m \cdot \frac{v}{t} \cdot \frac{1}{2} vt = \frac{1}{2} m \underbrace{v \cdot v}_{v^2} = \underline{\underline{\frac{1}{2} mv^2}}$$

Siis

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

MAOL s. 125

Liike-energian yksikkö:

$$[E_k] = [m][v^2] = [m][v]^2 = 1\text{kg}\cdot(1\text{m/s})^2$$

$$= 1\frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2} = 1\text{ J, OK}$$

Muunna nopeus aina SI-yksikköön!

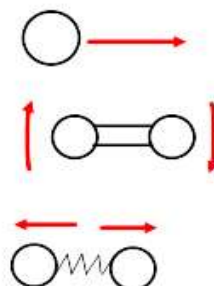
## 10 Lämpöopin I pääsääntö liittyy sisä-energian muutokseen

### Sisäenergia

Sisäenergia  $U$  = lämpöliikkeen liike-energioiden ja parivuorovaikutuksiin liittyvien potentiaalienergioiden summa

Liike-energia voi liittyä

- etenevään liikkeeseen
- pyörimisliikkeeseen
- värähdysliikkeeseen



Systemin sisäenergia voi muuttua kahdella tavalla:

- systeemiin tuodaan (tai sieltä poistetaan) lämpöä eli energiaa
- systeemiin tehdään työtä (puristetaan, venytetään tai annetaan laajentua)

## 1. pääsääntö:

Systemin sisäenergian muutos

$$\Delta U = Q + W$$

$Q$  = systeemiin tuotu lämpöenergia

$W$  = systeemiin tehty työ

Työllä voi olla etumerkki:

$W > 0$ , kun systeemiin tehdään ulkoista työtä

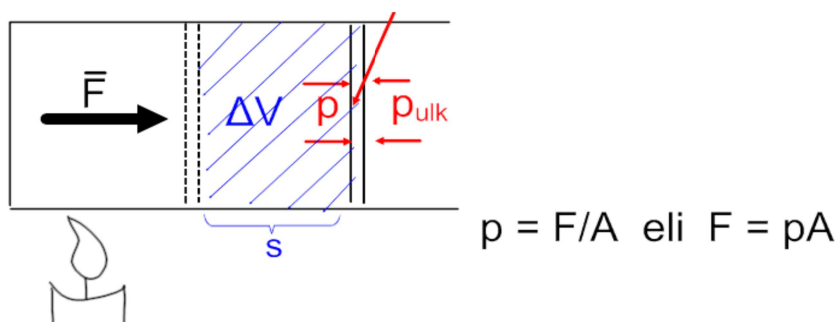
$W < 0$ , kun systeemi itse tekee työtä ja menettää omaa sisäenergiaansa

Myös lämpöenergialla  $Q$  voi periaatteessa olla etumerkki:

- $Q > 0$ , kun systeemiin tuodaan lisää lämpöenergiaa
- Vastaavasti  $Q < 0$ , kun systeemiä jähdytetään eli lämpöenergiaa poistetaan

## Laajenevan kaasun tekemä työ

-tarkastellaan kaasun ISOBAARISTA laajenemista (paine pysyy vakiona)



Isobaarisessa laajenemisessa tehty työ

$$W = Fs = pAs = p\Delta V$$

$$As = \Delta V$$

Siis  $W = p\Delta V$  Ks. MAOL

$$[W] = 1\text{J}, [p] = 1\text{Pa}, [\Delta V] = 1\text{m}^3$$

$$10.11. \quad V_1 = 0,50 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 2,0 \text{ m}^3$$

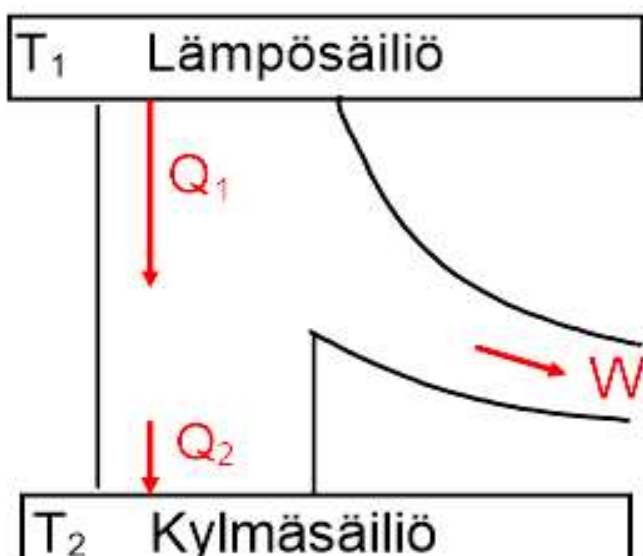
$$p = 4,0 \text{ bar} = 400000 \text{ Pa} = 400000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$W = p \Delta V = p(V_2 - V_1)$$

$$W = 400000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} (2,0 \text{ m}^3 - 0,50 \text{ m}^3)$$

$$W = 600000 \underbrace{\text{Nm}}_{\text{J}} = 0,60 \cdot 10^6 \text{ J} = 0,60 \text{ MJ}.$$

## 11 Koneet muuntavat energiaa muodosta toiseen



$$T_1 > T_2$$

Energian  
säilymlaki:

$$Q_1 = Q_2 + W \text{ eli}$$

$$W = Q_1 - Q_2$$

## Hyötysuhde

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

Ideaalinen lämpövoimakone:  $Q_1 = cmT_1$ ,  $Q_2 = cmT_2$

Silloin

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\cancel{cm}T_1 - \cancel{cm}T_2}{\cancel{cm}T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$\eta$  "eetta"

Siis

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

**Lämpötilat on muutettava kelvineiksi!**

Milloin hyötysuhde on täydellinen eli  $\eta = 1$ ?

$$\text{Silloin } \eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 \text{ eli } T_1 - T_2 = T_1.$$

Tästä seuraa, että  $T_2 = 0$  (= 0 K.)

Kylmävarasto toimii siis absoluuttisessa nolapisteessä!! Tämä on valitettavasti mahdotonta...



# Lämpövoimakoneen polttoaine

Polttoaineen lämpöarvo määritellään yhtälöllä

$$H = \frac{Q}{m} \quad \text{eli} \quad Q = H \cdot m$$

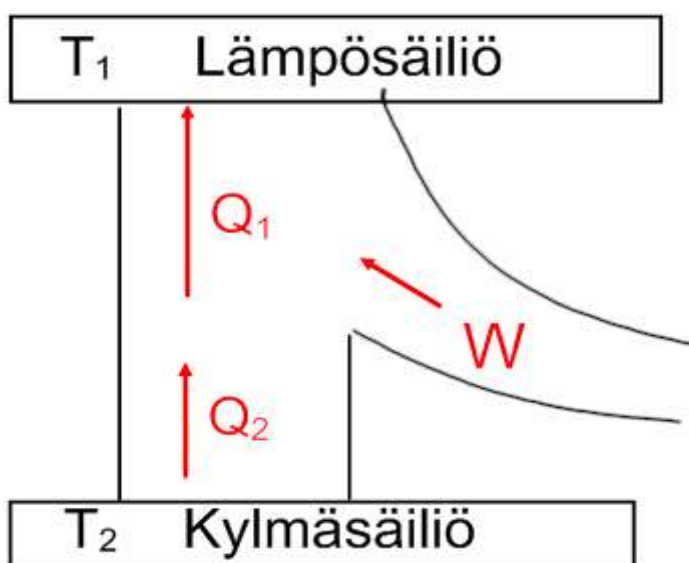
H = lämpöarvo, [H] = 1J/kg

Q = vapautuva lämpöenergia, [Q] = 1J

m = polttoaineen massa, [m] = 1kg

Lämpöarvo on suuri, jos polttoaine on hyvin vetypitoista ja siinä on mahdollisimman vähän kemiallisesti sidottua vettä.

## Lämmönsiirtokone



Energian säilymislaki:

$$Q_1 = Q_2 + W \quad \text{eli}$$

$$W = Q_1 - Q_2$$

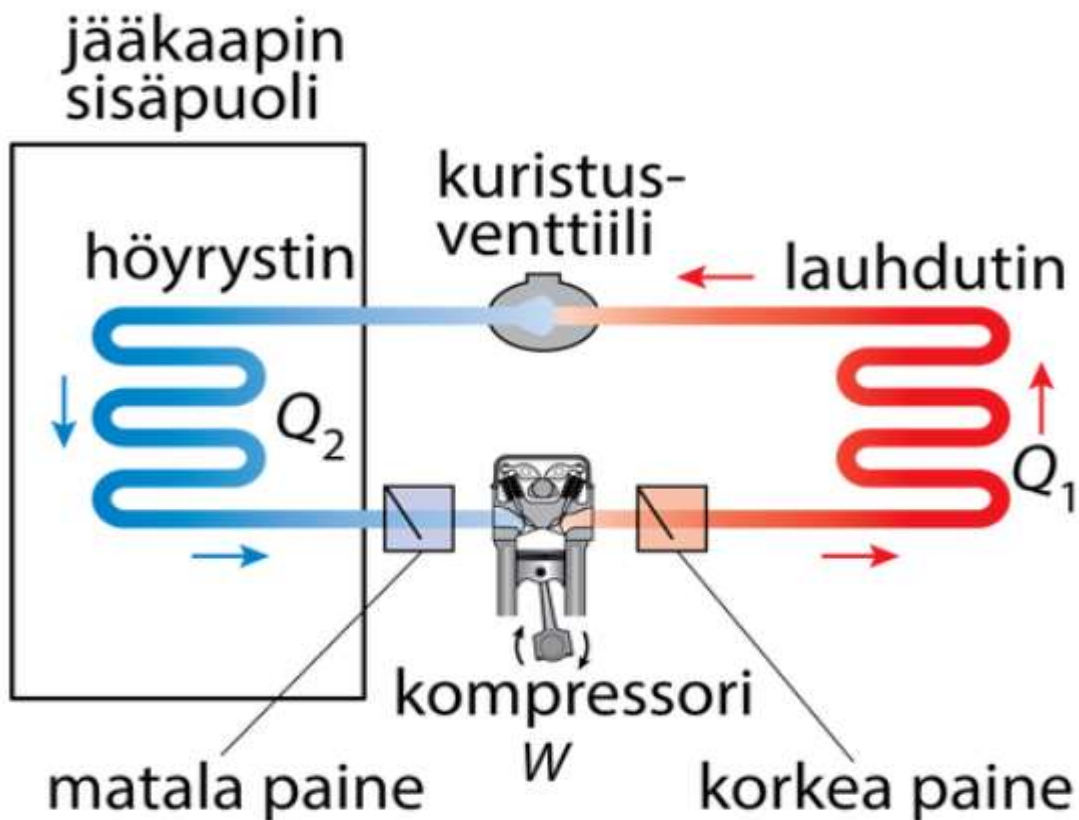
Suorituskyky

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \dots = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

"epsilon"

# Jäähdytyskoneet

## Jääkaappi



Toimintaperiaate:

- sopivaa nestettä höyrystetään alhaisessa lämpötilassa  $T_2$
- höyrystyminen KULUTTAA lämpöenergiaa, joten jääkaapin sisäosat jäähtyvät
- kompressor puristaa höyryä kovaan paineeseen

- kuristusventtiilin jälkeen neste höyrystyy uudestaan ja kierto alkaa alusta
- lopulta höyry TIIVISTYY lauhdutimessa ja LUOVUTTAA lämpöenergiaa ympäristöön

## **12 Entropia kuvaa systeemin epäjärjestystä**

### **Lämpöopin 2. pääsääntö**

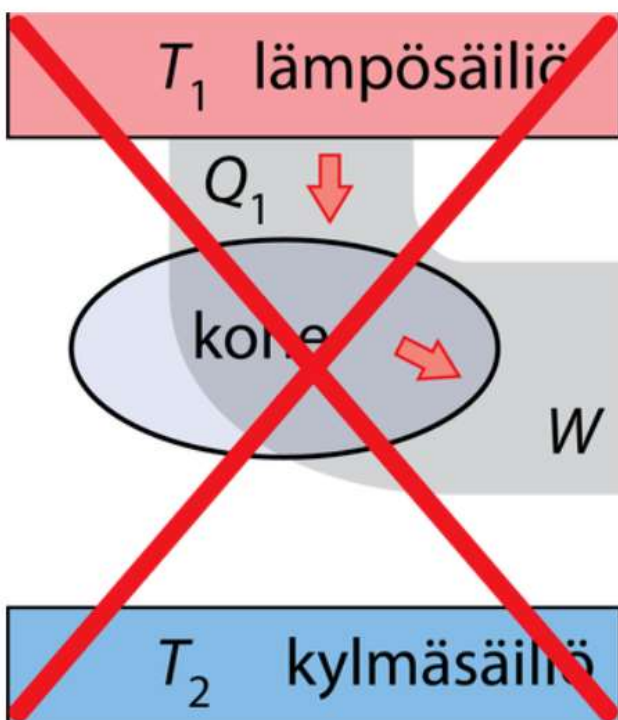
"Eristetyn systeemin epäjärjestys kasvaa, kun systeemi saavuttaa tasapainotilan. Epäjärjestys ei koskaan itsestään vähene."

Järjestystä voidaan lisätä

- energian ja
- informaation avulla

Toisen pääsäännön seurauksia:

- energia huononee aina silloin, kun se muuttuu lämmöksi, koska käänteinen reaktio ei tapahdu silloin itsestään
- Absoluuttista nolapistettä eli lämpötilaa  $T = 0 \text{ K}$  ei voida koskaan saavuttaa
- on mahdotonta rakentaa lämpövoimakonetta, joka muuntaisi kaiken lämpöenergian mekaaniseksi energiaksi



# 13 Kaasun tilan muuttuminen

## Kaasun tilanmuutos **vakiolämpötilassa** **-ISOTHERMINEN** prosessi

Oletukset:

-kineettisen kaasuteorian oletukset ovat voimassa (= IDEALIKAASUMALLI)

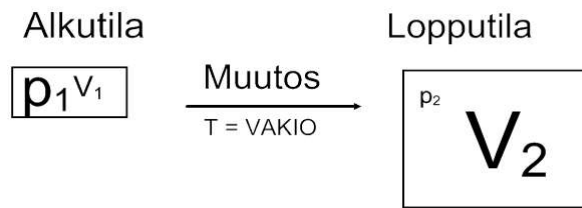
-kaasun ainemäärä on vakio

**-LÄMPÖTILA T = VAKIO**

### Tutkimus

P (Pa)	V(m <sup>3</sup> )	pV(Pam <sup>3</sup> = J)
100e3	50e-6	5,00
103e3	48e-6	4,94
109e3	46e-6	5,01
113e3	44e-6	4,97
121e3	42e-6	5,08
126e3	40e-6	5,04
132e3	38e-6	5,02
141e3	36e-6	5,08
148e3	34e-6	5,03
158e3	32e-6	5,06
169e3	30e-6	5,07

Johtopäätös: Mittaustarkkuuden rajoissa  
 $pV = \text{VAKIO}$ , kun  $T = \text{vakio}$ .



Alkutilan ( $p_1, V_1$ ) ja lopputilan ( $p_2, V_2$ ) välillä on ehto

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Boylen laki ( $T = \text{VAKIO}$ )

Painetilavuuslaki

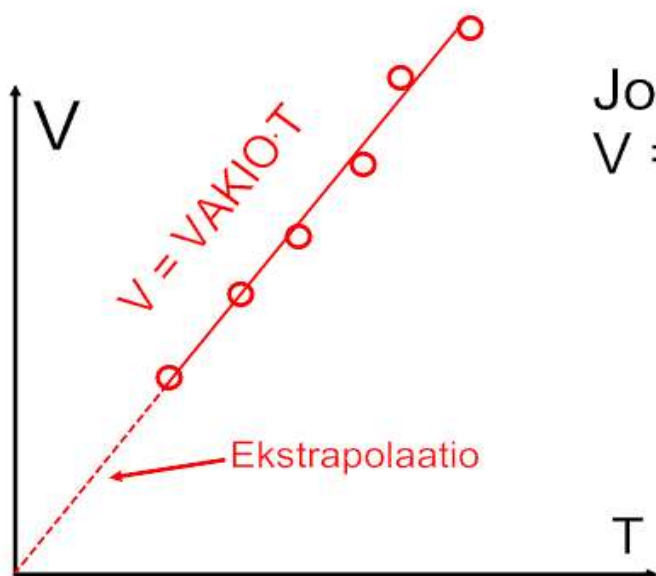
**Kaasun tilanmuutos vakiopaineessa**

- **ISOBAARINEN** muutosprosessi

Oletukset:

- IDEAALIKAASUMALLI
- kaasun ainemäärä on vakio
- PAINE  $p = \text{VAKIO}$

Silloin kaasun tilavuus muuttuu lämpötilan muuttuessa (tilavuuslämpötilalaki):



Johtopäätös:  
 $V = \text{VAKIO} \cdot T \quad | :T$

eli  $\frac{V}{T} = \text{VAKIO}$

Alkutila

$$\begin{matrix} V_1 \\ T_1 \end{matrix}$$

Muutos

$$\xrightarrow{p = \text{VAKIO}}$$

Lopputila

$$\begin{matrix} V_2 \\ T_2 \end{matrix}$$

Alkutilan ja lopputilan välillä on ehto

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Gay-Lussacin laki ( $p = \text{VAKIO}$ )

Lämpötilat on muunnettava kelvineiksi!

## Kaasun tilanmuutos **vakiotilavuudessa**

-**ISOKOORINEN** prosessi

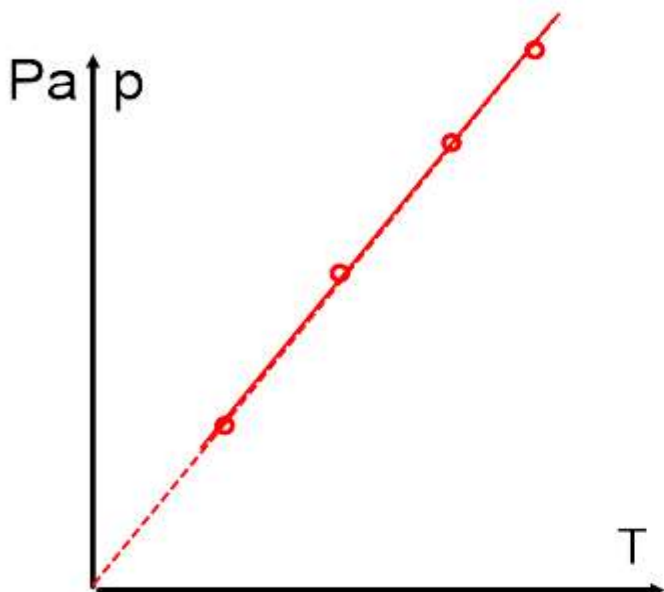
### Oletukset:

-IDEAALIKAASUMALLI

-kaasun ainemäärä on vakio

-TILAVUUS  $V = \text{VAKIO}$

Tyypillinen koetulos (paine- $\lambda$ mpötilalaki):

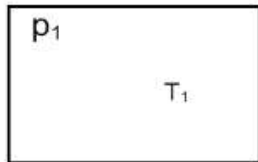


$$p = \text{VAKIO} \cdot T \quad | :T$$

$$\text{eli } \frac{p}{T} = \text{VAKIO}$$

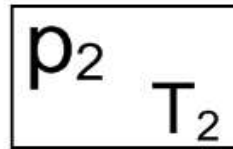


Alkutila



Muutos  
 $V = \text{VAKIO}$

Lopputila



Alkutilan ja lopputilan välillä on ehto

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Charlesin laki ( $V = \text{VAKIO}$ )

**Lämpötilat on muunnettava kelvineiksi!**

## 14 Ideaalikaasun tilanyhtälö yhdistää kaasulait

Oletukset:

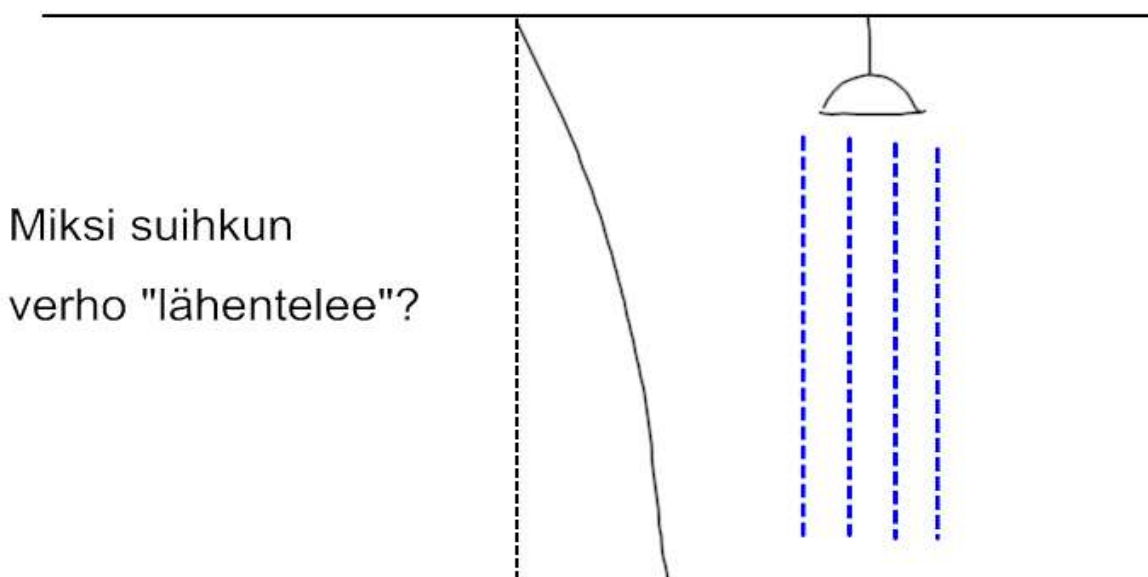
1. Rakenneosat ovat PIENIÄ (ja niitä on paljon):  
Atomeja ja molekyyliä. Niitä voidaan pitää pallosymmetrisinä hiukkasina, joilla ei ole hienorakennetta.
2. Rakenneosat ovat JATKUVASSA SATUNNAISLIIKKEESSÄ: Vauhti ja liikesuunta voivat yksittäisellä rakenneosalla muuttua jatkuvasti.

3. Rakenneosat törmäilevät toisiinsa ja astian seinämiin kimmoisasti (kokonaisliike-energia säilyy).
4. Törmäyksien lisäksi rakenneosilla ei ole muita keskinäisiä vuorovaikutuksia.  
(Huono oletus?)
5. Rakenneosien kokonaistilavuus on paljon pienempi kuin astian tilavuus. (Huono oletus?)

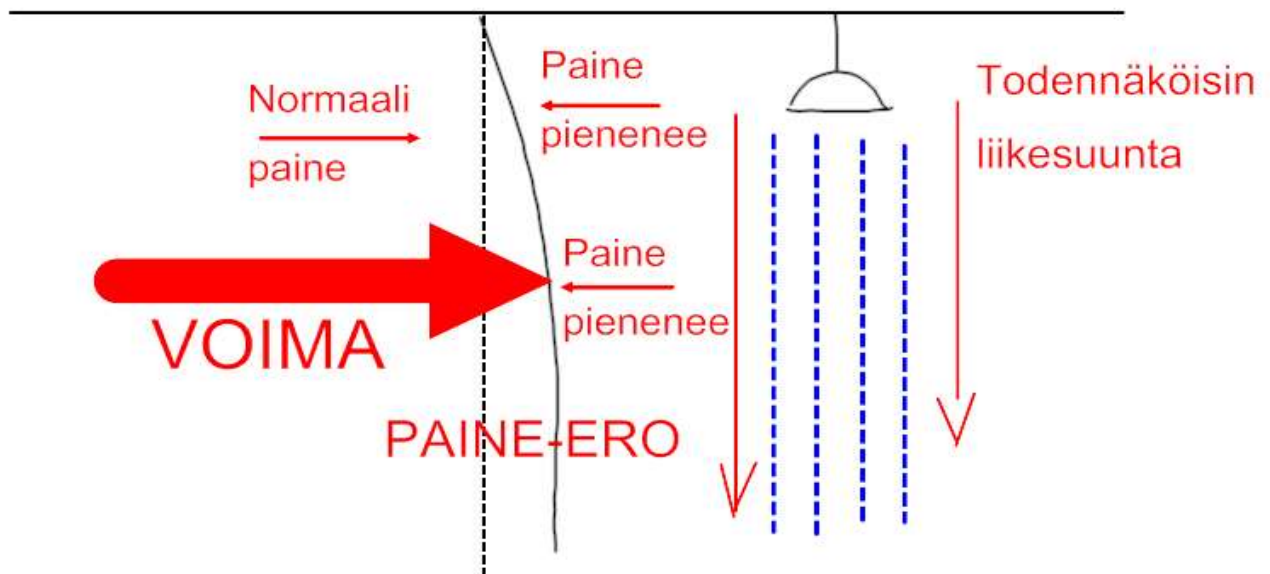
Kineettinen kaasuteoria toimii hyvin, kun

- LÄMPÖTILA on KORKEA
- TIHEYS on PIENI

Tarina suihkun verhosta...



## Tarina suihkun verhosta...



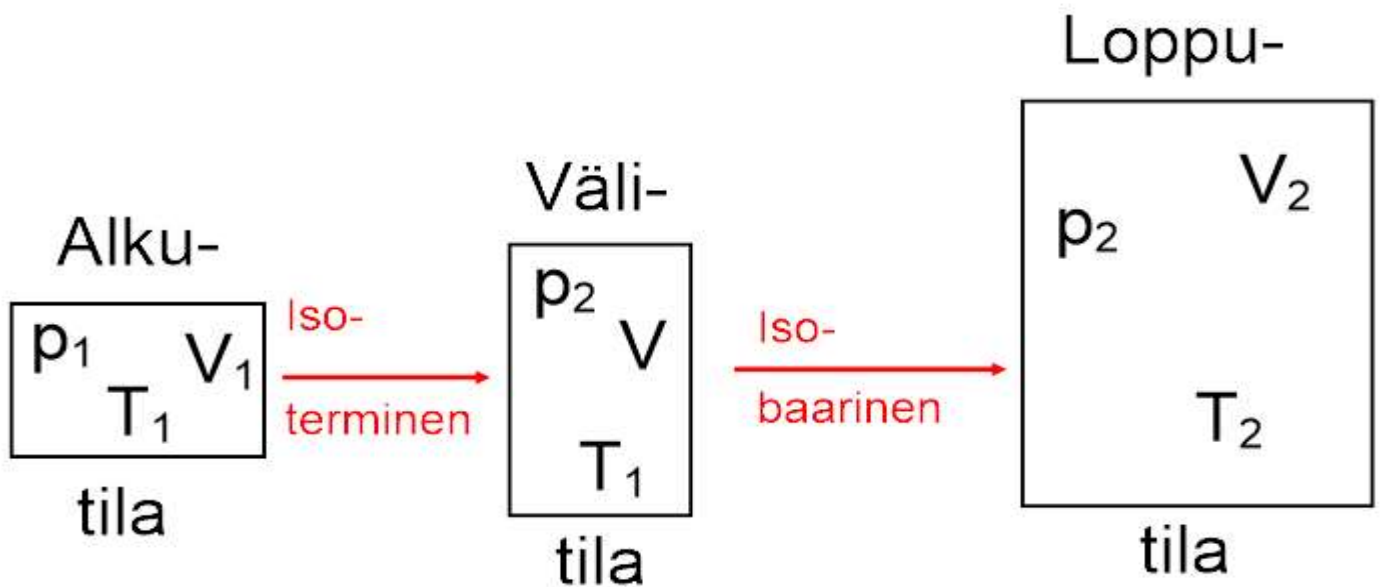
## Kaasujen yleinen tilanyhtälö

- kineettisen kaasuteorian oletukset ovat voimassa
- kaasun ainemäärä on vakio eli systeemi on SULJETTU

Yleisen tilanmuutoksen ongelma:



Ratkaisu:



Isoterminen prosessi: ( $T_1 = \text{VAKIO}$ )

$$p_1 V_1 = p_2 V$$

Isobaarinen prosessi: ( $p_2 = \text{VAKIO}$ )

$$\frac{V}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad | \cdot T_1$$

Ratkaistaan  $V$ :  $V = \frac{V_2 T_1}{T_2}$ .

Sijoitetaan  $V$  isotermisen prosessin yhtälöön:

$$p_1 V_1 = p_2 \underbrace{\frac{V_2 T_1}{T_2}}_V \quad | : T_1$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

eli

$$\frac{pV}{T} = \text{VAKIO}$$

**Lämpötilat on muunnettava kelvineiksi!**

Oleellista: Alkutilan ja lopputilan välillä on ehto

$$\begin{matrix} p_1 & V_1 \\ T_1 \end{matrix}$$



$$\begin{matrix} p_2 & V_2 \\ T_2 \end{matrix}$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

eli

$$\frac{pV}{T} = \text{VAKIO}$$

**Lämpötilat on muunnettava kelvineiksi!**

# Avogadron laki

Jos paine, tilavuus ja lämpötila ovat vakioita, KAIKKI kaasut (kemiallisesta koostumuksesta riippumatta) sisältävät yhtä monta rakenneosaa.

Rakenneosien lukumäärä yhdessä kaasumoolissa = Avogadron vakio  
 $= N_A \approx 6,022 \cdot 10^{23}$   
rakenneosaa

Kaasun normaalitila eli NTP:

**NTP = Normal Temperature and Pressure**

$$T_0 = 273,15\text{K} = 0,00 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_0 = 101325 \text{ Pa (} = \text{normaali ilmanpaine)}$$

Yhden kaasumoolin tilavuus NTP-olosuhteissa:

$$V_m = 22,413970 \text{ dm}^3/\text{mol} \approx \underline{22,4} \text{ dm}^3/\text{mol}$$

Ainemäärän (n) huomioon ottava  
**Ideaalikaasun tilanyhtälö** on

$$pV = nRT, \quad n = \frac{m}{M}$$

p = paine, [p] = 1Pa tai [p] = 1 bar

V = tilavuus, [V] = 1 m<sup>3</sup> tai [V] = 1 dm<sup>3</sup>

n = ainemäärä, [n] = 1 mol

m = kaasun massa, [m] = 1 g

M = kaasun moolimassa, [M] = 1 g/mol

T = absoluuttinen lämpötila, [T] = 1 K

R = moolinen kaasuvakio

$$= 8,314510 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 0,08314510 \frac{\text{bar} \cdot \text{dm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$1 \text{Pa} \cdot \text{m}^3 = 1 \text{J}$$

$$[p] = 1 \text{Pa}, [V] = 1 \text{m}^3$$

$$[p] = 1 \text{bar}, [V] = 1 \text{dm}^3$$

Kaasuvakion arvo riippuu siitä, missä yksiköissä sijoitat paineen ja tiavuuden. Lämpötila on kuitenkin AINA muun-nettava kelvineiksi.