

## 9. NOTRANJA ENERGIJA IN TOPLOTA

### 9.1 Kandidat naj zna definirati toploto in zapisati energijski zakon

Vsako telo v izbranem stanju, ki ga določata temperatura, tlak, prostornina, lahko pa tudi kemijski sestav in drugo, ima **notranjo energijo**, ki je odvisna od teh količin in sorazmerna z maso telesa. Predstavljati si smemo, da jo sestavljata dva dela: prvi del je energija termičnega gibanja, drugi del pa je odvisen od strukture snovi in od vezave atomov in molekul. Ko se zaradi vplivov okolice spremeni notranja energija, se spremeni tudi stanje snovi.

Velikosti notranje energije telesa ne poznamo. Vedno pa lahko povemo, za koliko se je notranja energija telesa spremenila.

Notranjo energijo telesa lahko spremenimo z delom, ki ga telo prejme ali odda. Stanje telesa se spremeni tudi, če je telo v stiku s telesom z drugačno temperaturo. V tem primeru telo prejema ali oddaja toploto. Sprememba notranje energije in z njo sprememba stanja ni odvisna od tega, kako je do spremembe prišlo – s samim delom, s samo toploto ali z obema hkrati.

Običajno lahko sklepamo na spremembo notranje energije telesa po spremembi temperature, vedno pa ni tako (npr. fazni prehodi).

Če telo ni toplotno izolirano, se spreminja notranja energija na račun dela in toplote:

$$\Delta W_n = A + Q$$

To je energijski zakon za primer, ko se telesu spreminja le notranja energija. Seveda se lahko telesu spremeni tudi kinetična, potencialna in prožnostna energija. Tedaj vključimo v enačbo tudi te spremembe.

Toplota je energija, ki ima to lastnost, da sama od sebe, brez dela, prehaja od telesa z višjo temperaturo na telo z nižjo temperaturo.

Energija telesa, ki je izolirano od okolice in z njo ne izmenjuje ne dela ne toplote, je konstantna. Pomeni, da je vsota sprememb kinetične, potencialne, prožnostne in notranje energije nič.

### 9.2 Kandidat naj zna pojasniti tlak in notranjo energijo idealnega plina z mikroskopsko sliko gibanja molekul in ju povezati s temperaturo

Molekule plina se termično gibljejo (dokaz Brownovo gibanje, difuzija). Povprečne razdalje med molekulami so velike v primerjavi s premerom molekule. Molekule se zadevajo ob trkih, sicer pa ne delujejo druga na drugo. Zato se ne menimo za razsežnosti molekul, dokler imamo opravka z razredčenim plinom. Tlak plina razlagamo kot posledico idealno prožnih trkov molekul, ki se zaradi translacijskega gibanja zadevajo v steno posode.

Plinsko enačbo  $p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$  nekoliko preuredimo. Števec in imenovalec ulomka na desni

strani enačbe delimo z Avogadrovim številom:  $p \cdot V = \frac{R/N_A}{M/N_A} \cdot T$

Kvocijent  $R/N_A$  je Boltzmanova konstanta:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K. Kvocijent  $M/N_A = m_1$  predstavlja maso ene same molekule.

Torej  $p \cdot V = \frac{m}{m_1} \cdot k \cdot T$ .

Kvocien  $m/m_1$  je enak številu  $N$  vseh plinskih molekul v masi  $m$ . Označimo število molekul v prostorninski enoti z  $n$  ( $n = N/V =$  številna gostota molekul). Zato  $p = n \cdot k \cdot T$

*Tlak plina je pri konstantni temperaturi sorazmeren s številsko gostoto molekul (na drug način povedan Boylov zakon). Guy Lussacov zakon lahko povemo takole: pri konstantnem tlaku je številna gostota molekul plina obratno sorazmerna s temperaturo.*

Enačba izraža tudi Avogadrov zakon na drug način: *pri izbranem tlaku in temperaturi je številna gostota molekul pri vseh plinih enaka.*

### **Razlaga tlaka plina:**

Obravnavamo plin z  $n$  molekulami na enoto prostornine in temperaturo  $T$ , ki je zaprt v kockasti posodi. Hitrosti molekul naj bodo po velikosti enake in usmerjene pravokotno na steno kocke. Po  $1/6$  celotnega števila molekul se giblje proti vsaki od šestih ploskev kocke. V času  $\Delta t$  zadene izbrano ploskev  $1/6$  molekul, ki so v kvadru, ki ima za osnovno ploskev ploskev kocke, za višino pa premik molekul v času  $\Delta t$ , torej:  $\Delta N = (1/6) \cdot nS(v\Delta t)$ .

Iz tega določimo tok molekul  $\Phi = \frac{\Delta N}{\Delta t} = (1/6) \cdot n \cdot S \cdot v$  in masni tok:

$$\Phi_m = m_1 \cdot \Phi = (1/6) \cdot nm_1 Sv.$$

Pri trku se curek molekul odbije z nasprotno hitrostjo in deluje na steno s silo:  $F = \Phi_m \cdot \Delta v = \Phi_m (2v) = (1/3)nm_1 Sv^2$

Tlak je potem enak:  $p = \frac{F}{S} = \frac{1}{3}nm_1 v^2$ .

Produkt  $m_1 v^2$  je enak dvojni translacijski kinetični energiji molekule. Tako dobimo:

$$p = \frac{2}{3} \cdot n W_k$$

Dobljena enačba velja tudi, če molekule nimajo enakih hitrosti, le kinetično energijo molekule moramo v izrazu nadomestiti s *povprečno kinetično energijo*:  $p = \frac{2}{3} \cdot n \bar{W}_k$ .

Tako izračunani tlak se mora ujemati s tistim, ki ga izraža plinska enačba:  $nkT = \frac{2}{3} \cdot n \bar{W}_k$ .

Zato je povprečna kinetična energija molekul plina sorazmerna s temperaturo:  $\bar{W}_k = \frac{3}{2} kT$ .

Temperatura je torej merilo **za povprečno translacijsko kinetično energijo** molekul v plinu. Tudi vrtenje molekul in nihanje atomov v molekulah je odvisno od temperature.

Povprečna kinetična energija molekul pri 300 K je okoli 0,017 eV. Iz enačbe za kinetično energijo lahko izračunamo efektivno hitrost plinskih molekul pri izbrani temperaturi:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2\bar{W}_k}{m_1}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_1}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Za kisik izračunamo 480 m/s, za dušik pa 520 m/s za temperaturo 300 K.

### Notranja energija plina:

V plinu, ki bi ga sestavljale le idealno toge in gladke kroglaste molekule, bi notranjo energijo v celoti sestavljala le translacijska kinetična energija molekul. Plin z maso  $m$ , v katerem bi bilo  $N=m/m_1$  molekul, bi imel notranjo energijo:  $W_n = N\overline{W}_k = \frac{m}{m_1} \cdot \frac{3kT}{2} = m \cdot \frac{3R}{2M} \cdot T$ , ki bi bila odvisna le od temperature. Ko bi se plinu zaradi dela ali zaradi toplote spremenila notranja energija, bi se mu spremenila tudi temperatura.

Ob segrevanju pri konstantni prostornini plin ne opravlja dela, zato je po energijskem zakonu dovedena toplota enaka spremembi notranje energije:  $Q = mc_v \cdot \Delta T = \Delta W_n$ .

Iz enačbe izračunamo specifično toploto pri konstantni prostornini:  $c_v = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta W_n}{\Delta T}$ , ki znaša za

naš idealni plin  $c_v = \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{M}$ .

Izračunane specifične toplote se ujemajo z izmerjenimi pri žlahtnih plinih, ki so enoatomni. Specifične toplote plinov, ki imajo molekule iz več atomov, so večje od izračunanih. K notranji energiji prispeva poleg translacije molekul še gibanje atomov v molekuli.

9.3 Kandidat naj zna definirati specifično toploto in jo uporabiti pri reševanju kalorimetričnih nalog

Toplota, ki jo je treba dovesti telesu z maso  $m$ , da se pri konstantnem tlaku segreje za izbrano temperaturno razliko  $\Delta T$ , je

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T.$$

$c_p$  je *specifična toplota snovi pri stalnem tlaku*. Ta pove, koliko toplote segreje 1 kg snovi za 1 K, ko je tlak stalen. Za vodo:  $c_p = 4200 \text{ J/kgK}$ .

Ko se telo greje, se razteza in pri tem opravlja delo:

$$A = -p \cdot \Delta V.$$

Pri trdninah in pri kapljevinah je to delo majhno, zato je sprememba notranje energije kar enaka prejeti toploti.

Specifično toploto snovi merimo npr. v vodnem kalorimetru. Gre za primerjavo specifične toplote vode s specifično toploto merjenca. Merjenec s temperaturo  $T_2$  odda v kalorimetski posodi v vodi toploto, ki povzroči, da se ta segreje od začetne temperature  $T_1$  na zmesno temperaturo  $T$ . Velja kalorimetska enačba:

$$m_2 c_{p2} \cdot (T_2 - T) = m_1 c_{p1} \cdot (T - T_1),$$

v kateri upoštevamo, da odda merjenec vodi toploto, voda pa jo ravno toliko sprejme. Iz enačbe izračunamo toploto vzorca  $c_{p2}$ .

Stara enota za merjenje toplote je kilokalorija. To je toplota, ki segreje kilogram vode za 1 K. Potemtakem je specifična toplota vode 1 kkal/kg K. Zveza: 1 kkal = 4200 J.

9.4 Kandidat naj zna uporabiti energijski zakon pri spremembah plina ter ločiti med specifično toploto pri stalnem tlaku in stalni prostornini

Plini se pri segrevanju močno raztezajo, pri tem odpravljajo okolni zrak in opravljajo delo. Zato definiramo za pline dve specifični toploti:  $c_p$  (**pri stalnem tlaku**) in  $c_v$  (**pri stalni prostornini**).

Zrak:  $c_p = 1010 \text{ J/kg K}$        $c_v = 720 \text{ J/kg K}$

Razlika specifičnih toplot (290 J) predstavlja delo, ki ga opravi 1 kg zraka, ko se segreje za 1 K.

$$A = p \cdot \Delta V = p \cdot (m / \rho) \cdot \beta \cdot \Delta T = 1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 \cdot (1 \text{ kg} / 1,3 \text{ kg/m}^3) \cdot (1 / 273 \text{ / K}) \cdot 1 \text{ K} = 286 \text{ J}$$

Splošno:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

$$p \cdot \Delta V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot \Delta T$$

$$\frac{p \cdot \Delta V}{m \cdot \Delta T} = \frac{R}{M} \quad \text{in} \quad c_p - c_v = \frac{R}{M}.$$

Segrejemo 1 kg zraka pri  $p = \text{konst.}$  Dovedli smo toploto  $Q$  (1010 J). Sprememba notranje energije zraka je:

$$\Delta W_n = Q + A = m \cdot c_p \cdot \Delta T - p \cdot \Delta V = 1010 \text{ J} - 290 \text{ J} = 720 \text{ J}.$$

Če segrejemo 1 kg zraka pri  $V = \text{konst.}$ , dovedemo toploto  $Q$  (720 J). Ker se zrak zdaj ne razteza ( $A = 0$ ), je sprememba notranje energije enaka  $\Delta W_n = Q = 720 \text{ J}$

V obeh primerih se torej notranja energija zraka enako spremeni. Temperatura zraka se je dvignila za 1 K. Če bi dovedli več toplote, bi se notranja energija zraka bolj spremenila, temperaturna sprememba bi bila večja.

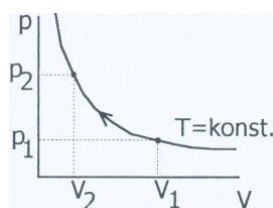
Sklep: **Notranja energija plina je funkcija njegove absolutne temperature:**  $W_n = W_n(T)$ .

Stanje določene mase plina je določeno s termodinamskimi spremenljivkami  $p$ ,  $V$ ,  $T$ . Če se ena od njih spremeni, se spremenijo tudi druge. Pravimo, da je plin doživel spremembo (npr. prostornine, temperature, tlaka). Sprememba je določena z zunanjimi pogoji, pri katerih poteka.

### Izotermna sprememba:

To je sprememba, ki poteka pri stalni temperaturi. Za to spremembo velja  $\Delta W_n = 0$ . Iz energijskega zakona  $\Delta W_n = A + Q$  sledi:  $A + Q = 0$  in  $A = -Q$ .

Plin prejme toliko dela, kolikor toplote odda. Ali: plin odda toliko dela, kolikor toplote prejme. Za izotermno spremembo velja plinska enačba in s tem Boylov zakon ( $p \cdot V = \text{konst.}$ ).



Graf  $p(V)$  je izoterma. Za spremembo velja:  $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$

Ploščina lika med grafom  $p(V)$  in abscisno osjo je merilo za delo, opravljeno pri določeni spremembi. To ploščino lahko izračunamo z integralom.

### Adiabatna (izentropna) sprememba:

To je sprememba, pri kateri je izmenjana toplota z okolico enaka nič ( $Q = 0$ ). Iz energijskega zakona  $\Delta W_n = A + Q$  sledi  $\Delta W_n = A$ .

*Sprememba notranje energije plina je enaka dovedenemu delu.*

Če plinu dovajamo delo, se njegova notranja energija povečuje, temperatura pa mu zraste. Če plin opravlja delo, se njegova notranja energija zmanjšuje, plin se ohlaja.

Ostale spremembe:

izobarna pri  $p = \text{konst.}$

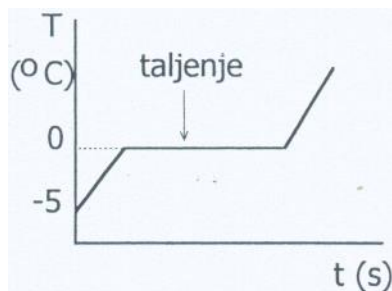
izohorna pri  $V = \text{konst.}$

9.5 Kandidat naj zna opisati prehode med agregatnimi stanji, definirati izparilno in talilno toploto in ju uporabiti pri reševanju kalorimetričnih nalog

Taljenje je prehajanje trdnine v kapljevino. Temperatura, pri kateri se to zgodi, je *tališče*. Le snovi s kristalno strukturo imajo ostro določeno tališče, ostale snovi zvezno prehajajo iz trdne faze v kapljevino. Taljenje poteka pri stalni temperaturi, to je izotermen proces.

Obraten prehod imenujemo strjevanje (zmrzovanje). Poteka pri isti temperaturi kot taljenje.

Zmrzlišče vode se močno zniža, če so v vodi raztopljene različne soli, npr. slana voda z razmerjem sol : voda = 1 : 2 ima zmrzlišče pri  $-18^\circ\text{C}$ .



Tališče snovi je nekoliko odvisno od tiska. Snovem, katerim se prostornina pri taljenju poveča, se tališče s tlakom zvišuje, snovem, katerim se prostornina pri taljenju zmanjša, pa se tališče pri povečanju tiska zniža. Tališče ledu se s povečanjem tiska nekoliko zniža, približno za  $0,0075^\circ\text{C}$  pri spremembi tiska za 1 bar.

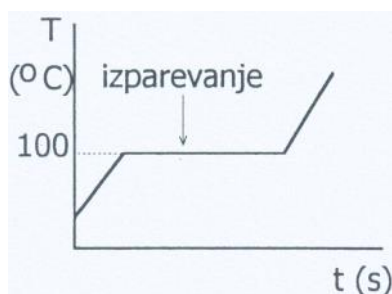
Led plava na vodi, gostota ledu je torej manjša od gostote vode.  $1\text{ cm}^3$  vode zmrzne v  $1,09\text{ cm}^3$  ledu; prostornina vode se z zmrznitvijo poveča za 9%.

Toploto  $Q_t$ , ki jo je treba dovesti do tališča segreti snovi, da se povsem stali, imenujemo *talilno toploto*. Sorazmerna je z maso  $m$  snovi:

$$Q = q_t \cdot m$$

Sorazmernostni koeficient  $q_t$  imenujemo *specifično talilno toploto*. To je toplota, ki jo moramo dovesti 1 kg do tališča segrete snovi, da se povsem stali.

Pri strjevanju (kristalizaciji) snovi moramo talilno toploto odvesti. Specifična talilna toplota ledu je  $336\text{ kJ/kg} = 80\text{ kkal/kg}$  pri  $0^\circ\text{C}$ .



Izparevanje je prehajanje kapljevine v plinasto stanje. Temperaturo, pri kateri se to zgodi, imenujemo *vrelišče*. Obraten pojav poteka pri isti temperaturi, imenujemo ga zgoščevanje (kondenzacija). Vrelišče je za kapljevino značilen podatek. Vrelišče kapljevine je zelo odvisno od tiska nad njo. Tudi izparevanje (vrenje) je izotermen proces.

Tudi pri izhlapevanju prehaja kapljevina v plin (hlape) in to pri temperaturi, ki je nižja od vrelišča. Na izdatnost izhlapevanja vpliva temperatura, površina, s katere odhlapeva kapljevina, hitrost odstranjevanja hlapov in seveda vrsta kapljevine.

V odprti posodi lahko kapljevina povsem izpari. V zaprti posodi pri stalni temperaturi pa izhlapeva kapljevina le toliko časa, dokler se med kapljevino in paro ne vzpostavi ravnovesje. Tedaj se izparevanje in kondenzacija uravnovesita tako, da ostaneta masi kapljevine in pare stalni. Takšno ravnovesje imenujemo *dinamično*. Para, ki je s svojo kapljevino v dinamičnem ravnovesju, je *nasičena para*.

Pri izparevanju nastaja para. *Para je nasičena*, če je v stiku s kapljevino, ki vre. Njen tlak imenujemo *tlak nasičene pare* ali *izparilni tlak*. Tlak nasičene pare je močno odvisen od temperature; s temperaturo narašča.

Kapljevina vre pri tisti temperaturi, pri kateri je njen izparilni tlak enak tlaku nad kapljevino. Tudi: kapljevina izhlapeva toliko časa, da je tlak njene pare enak izparilnemu tlaku pri isti temperaturi.

Pri 100°C je tlak nasičene pare 1,013 bar. Tolikšen je tudi zračni pritisk pri normalnem vrelišču in tlak v vreli vodi (v njej nastajajo mehurji nasičene pare).

V zaprtem prostoru s temperaturo 20°C, v kateri imamo odprt lonc vode, bo izhlapelo toliko vode, da bo tlak vodne pare enak 0,0233 bar. Na odprtem prostoru do ravnovesja navadno ne more priti in voda prej ali slej vsa izhlapi.

Vrelišče vode se z nižanjem tlaka nad gladino niža. S primernim tlakom lahko dosežemo, da vre voda tudi pri 0°C. Če tlak nad vodo še znižamo, pride do direktnega prehajanja trdnine v plinasto fazo (razhlapevanje, sublimacija).

Z višanjem tlaka nad kapljevino se vrelišče viša. Pri tlaku 2 bar je vrelišče vode pri 120 °C .

Vrelišče vode (in drugih kapljev) lahko na ta način višamo do *kritične temperature*, ki je za vodo 374°C. Tlak, ki je za to potreben, je *kritični tlak* (221 bar). Pri kritični temperaturi izgine razlika med kapljevino in paro (gladine ni več); nad kritično temperaturo kapljevina ne obstoja. S segrevanjem kapljevine se njena gostota zaradi temperaturnega raztezanja manjša, zaradi stiskanja pare nad kapljevino pa se gostota pare večja. Pri kritični temperaturi sta obe gostoti enaki, razlike med kapljevino in paro ni več.

Zrak in drugi plini so pravzaprav pare kapljev in pri temperaturi, ki je veliko višja od kritične temperature. Če hočemo zrak spremeniti v kapljevino (utekočiniti), ga moramo ohladiti pod kritično temperaturo in primerno stisniti.

Za izparevanje je potrebna toplota. Če hočemo, da do vrelišča segreta kapljevina povsem izpari, ji moramo dovesti toploto  $Q_i$ . Pri kondenzaciji, t.j. pri obratnem prehodu, moramo enako množino toplote odvesti.

Izparilna toplota  $Q_i$  je sorazmerna z maso  $m$  kapljevine:

$$Q = q_i \cdot m$$

Sorazmernostni faktor  $q_i$  imenujemo *specifično izparilno toploto*. Specifična izparilna toplota je toplota, ki jo moramo dovesti 1 kg do vrelišča segrete kapljevine, da povsem izpari.

Specifična izparilna toplota vode je 2,26 MJ/kg = 540 kkal/kg (pri 100°C)

Del toplote, ki jo dovedemo kapljevini pri izparevanju, se porabi za povečanje notranje energije nastale pare, del pa se porabi za opravljanje dela, ko para odriva okolišnji zrak.

Prehajanje trdnine v plinasto stanje imenujemo *razhlapevanje*, obraten pojav pa *sublimacija*.

Voda: edina temperatura, pri kateri so vse tri faze (agregatna stanja) v ravnovesju, je 273,16 K – to je **trojna točka** vode (normalni tlak).

#### 9.6 Kandidat naj zna definirati toplotni tok in koeficient toplotne prevodnosti

Prevajanje toplote je širjenje toplote po snovi. Toplota potuje v smeri od višje temperature proti nižji temperaturi. Zaradi prevajanja se toplejša mesta snovi ohlajajo, hladnejša pa segrevajo. Toplota preneha teči, ko imajo vsi deli snovi enako temperaturo, to je, ko je snov v **toplotnem ravnovesju**.

Toplotni tok  $P$  je množina toplote, ki v enoti časa preteče skozi prečni prerez snovi:

$$P = \frac{Q}{t}.$$

Enota za toplotni tok je J/s ali W.

Toplotni tok ima pri prevajanju toplote podobno vlogo kot masni ali prostorninski tok pri pretakanju tekočina oziroma kot električni tok pri prevajanju električnega naboja. Toplotni tok je posledica **temperaturne razlike**.

#### 9.7 Kandidat naj zna izračunati toplotni tok skozi steno v stacionarnih razmerah

Toplotni tok skozi steno:

V steni naj bodo stacionarne razmere – temperatura v steni je na vsakem mestu stalna in se s časom ne spreminja. Pravimo, da je le funkcija kraja, ne pa časa. Temperaturne razlike v steni so stacionarne le, če jih vzdržujemo, to je, da eno stran segrevamo, drugo pa ohlajamo. Takrat je toplotni tok skozi vsak prečni presek stene stalen. Kolikor toplotnega toka priteka v steno, toliko ga tudi odteka.

Toplotni tok  $P$  skozi steno (palico) je sorazmeren s temperaturno razliko  $\Delta T$  med obema mejama stene, sorazmeren s prečnim presekom stene  $S$  in obratno sorazmeren z debelino stene  $d$ :

$$P = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{d}.$$

Sorazmernostni faktor  $\lambda$  je **toplotna prevodnost** snovi. To je podatek, značilen za vsako snov. Pove, kolikšen toplotni tok teče skozi 1 m<sup>2</sup> 1 m debele stene pri temperaturni razliki 1 K.

Toplotna prevodnost kovin je velika, toplotna prevodnost izolatorjev pa majhna.

Stiropor  $\lambda = 0,04$  W/mK, opeka  $\lambda = 0,6$  W/mK, aluminij  $\lambda = 210$  W/mK.

Kvocien  $\Delta T/d$  predstavlja spremembo temperature na enoto dolžine v smeri širjenja toplotnega toka; imenuje se **temperaturni gradient**.

Poleg toplotnega toka podajamo včasih tudi gostoto toplotnega toka  $j$ :  $j = \frac{P}{S}$ , ki pove, kolikšen toplotni tok gre skozi 1 m<sup>2</sup> veliko ploskev, pravokotno na smerširjenja toplotnega toka. Enota je W/m<sup>2</sup>.

Gostota toplotnega toka v steni:  $j = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{d}$

Enačbo za toplotni tok  $P$  prepisemo v drugačno obliko:  $P = \frac{\Delta T}{\left(\frac{d}{\lambda S}\right)}$ .

Količnik v imenovalcu  $d/(\lambda S)$  imenujemo **toplotni upor** stene:  $R = \frac{d}{\lambda S}$ .

Toplotni tok  $P$  teče skozi snov; poganja ga temperaturna razlika  $\Delta T$ . Toplotni upor stene je sorazmeren dolžini ter obratno sorazmeren s presekom in toplotno prevodnostjo stene.

Toplotni tok je sorazmeren s temperaturno razliko in obratno sorazmeren s toplotnim uporom stene:  $P = \frac{\Delta T}{R}$ .

Vpeljava toplotnega upora je koristna, če imamo opravka s steno, ki je sestavljena iz več različnih plasti. Zaporedne plasti obravnavamo kot zaporedno zvezane toplotne upornike. Toplotni tok skozi vsako plast je enako velik. Toplotne upore posameznih plasti seštevamo; celoten upor stene je vsota posameznih uporov plasti:  $R = R_1 + R_2 + \dots$

#### 9.8 Kandidat naj zna ločevati med reverzibilnimi in ireverzibilnimi pojavi

**Reverzibilna** je sprememba, ki jo moremo v vsakem trenutku natančno ponoviti v nasprotni smeri; pri tem pridejo vsa udeležena telesa nazaj v začetno stanje. Reverzibilna sprememba poteka skozi sama **ravnovesna stanja** in je brez toplotnih izgub ali trenja. V naravi ni reverzibilnih sprememb, lahko pa se jim dovolj približamo, če dopustimo le skrajno počasne spremembe (*kvazistatične spremembe*).

Za reverzibilni pojav ali spremembo je torej značilno, da telo na koncu lahko spravimo preko istih vmesnih stanj nazaj v prvotno stanje in sicer z ravno takšnimi silami kot pri prvotni spremembi. Če pa se da to izvesti samo z drugačnimi silami kot prvotno, je sprememba **ireverzibilna**. Dogovorili se bomo, da bomo pri razločevanju upoštevali tudi temperaturo in vse druge okoliščine, ki poleg sil morda vplivajo na potek pojava ali spremembe.

Za reverzibilnost spremembe ni dovolj, da je sprememba obrnljiva, ampak je pomembno še, da so zunanje okoliščine pri obrnjeni spremembi enako kot pri prvotni.

Ko kako spremembo obrnemo, je seveda gibanje vseh delov telesa nasprotno usmerjeno kot pri prvotni spremembi. Podobno se obrnejo tudi toplotni tokovi ter morebitni električni tok v telesu.

Če hočemo, da je sprememba reverzibilna, morajo biti izpolnjeni trije pogoji:

1. sprememba se mora dati obrniti, tako da je telo na koncu v enakem stanju in v isti legi kot prvotno.
2. Obrnjena sprememba se mora dati izvesti tako, da poteka preko istih vmesnih stanj, istih vmesnih leg, z nasprotno enakimi hitrostmi ter z obrnjenimi toplotnimi tokovi kot prvotna sprememba.
3. Tako obrnjena sprememba se mora dati izvesti pri enakih zunanjih silah, temperaturi in drugih okoliščinah kot prvotna sprememba.



Če kateri od gornjih pogojev ni izpolnjen, je sprememba ireverzibilna.

Reverzibilne spremembe:

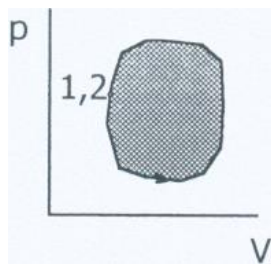
- Počasno stiskanje ali razpenjanje zraka v valju z batom
- Počasno zmrzovanje vode pri 0°C
- Natezanje jeklene vijačne vzmeti
- Gibanje planetov okoli Sonca

Ireverzibilne spremembe:

- Odvijanje zarjavelega vijaka
- Zmrzovanje podhlajene vode
- Mešanje malinovca
- Kemijske reakcije (npr. gorenje lesa)
- Hitro dovajanje ali odvzemanje toplote telesu
- Natezanje svinčene žice
- Padanje kamna v zraku (upor!)
- Trk neprožnih teles
- Gnetenje testa
- Pretakanje viskozne tekočine
- Vsako gibanje s trenjem
- Toplotno prevajanje

#### 9.9 Kandidat naj zna definirati krožno spremembo

Krožno spremembo imenujemo spremembo, pri kateri se snov preko drugih stanj spet vrne v prvotno stanje. Ali: sprememba je krožna, če prevede telo ali sistem nazaj v prvotno stanje.



Na sliki je primer krožne spremembe. Ploščina lika znotraj zaključene poti predstavlja pri spremembi opravljeno delo.

Notranja energija delovne snovi se pri krožni spremembi nič ne spremeni; sprejeta toplota in delo sta torej nasprotno enaka:

$$Q = -A$$

Kolikor dela snov med krožno spremembo prejme, toliko toplote odda.

#### 9.10 Kandidat naj zna opisati delovanje toplotnega stroja in definirati njegov izkoristek

Toplotni stroji so priprave, ki spreminjajo toploto v mehansko delo. Pri tem delovna snov v stroju (običajno voda ali plih) stalno prestaja določeno **krožno spremembo**.

Notranja energija delovne snovi se pri krožni spremembi nič ne spremeni. Kolikor dela dobimo, toliko toplote porabimo:  $Q = -A$ .

Za krožno spremembo snovi v toplotnem stroju je značilno to, da snov med spremembo pretvori nekaj prejete toplote v mehansko delo. Da je ta pretvorba mogoča, moramo ustvariti v stroju **temperaturno razliko**; delovni snovi je treba dovesti toploto pri višji temperaturi in obenem poskrbeti za to, da lahko nekaj toplote odda pri nižji temperaturi. Brez temperaturne

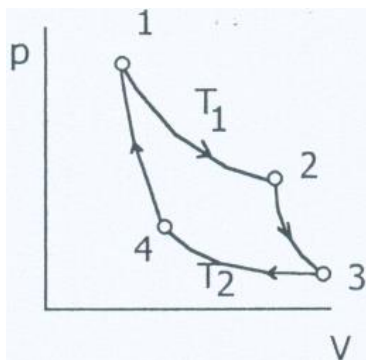
razlike ne more nobena snov oddati v krožni spremembi več dela, kot ga sprejme, in torej ne more spremeniti v delo nič toplote.

**Izkoristek toplotnega stroja** imenujemo razmerje med delom, ki ga stroj odda, in toploto, ki

jo sprejme:  $\eta = \frac{A}{Q}$ .

Od vseh toplotnih strojev ima največji izkoristek toplotni stroj, v katerem so vse spremembe *reverzibilne*. Imenujemo ga **idealni toplotni stroj**.

Idealni toplotni stroj z idealnim plinom kot delovno snovjo si je izmislil Sadi Carnot. V *Carnotovem stroju* prestaja plin reverzibilno krožno spremembo, sestavljeno iz naslednjih sprememb:



1. Pri stalni temperaturi  $T_1$  dovedemo plinu toploto  $Q_1$  (izoterma 12). Pri tem se plin razpne in opravi delo, ki je enako dovedeni toploti. Notranja energija plina se ne spremeni.

2. Plin se adiabatno razpne (adiabata 23). Zaradi opravljenega dela se pri tem plin ohladi do temperature  $T_2$ . Notranja energija se zmanjša za opravljeno delo:  $\Delta W_n = A = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$

3. Pri stalni temperaturi  $T_2$  plin stisnemo (izoterma 34). Pri tem moramo dovesti toploto  $Q_2$ , enako dovedenemu delu.

4. Plin adiabatno stisnemo do prvotnega stanja (adiabata 41). Notranja energija plina se poveča za prejeto delo:  $\Delta W_n = A = m \cdot c_v \cdot (T_1 - T_2)$

Celotno delo  $A$ , ki ga plin odda pri opisani krožni spremembi, je enako razliki med oddanim delom pri spremembi 123 in prejetim delom pri spremembi 341. Po energijskem zakonu je to delo enako razliki med prejeto toploto  $Q_1$  in oddano toploto  $Q_2$ . Izkoristek Carnotovega stroja je tedaj:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Pri opisani krožni spremembi dobimo za izkoristek izraz:

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

Napisani izraz splošno velja za poljuben toplotni stroj, ki deluje reverzibilno med temperaturama  $T_1$  in  $T_2$ . Toplotni stroji v praksi ne delujejo reverzibilno; izkoristek je vedno manjši od napisanega.