

## Thermodynamica

kleine letter  $\rightarrow$  per massa-eenheid  
 $\bullet \rightarrow$  per tydseenheid

- klassieke thermodynamica = macroscopische benadering
- statistische thermodynamica = microscopische benadering gebaseerd op het gemiddelde gedrag van een groep van individuele partikels

## Behoud van energie

Gedurende een interactie kan E overgaan v/d ene naar de andere vorm,  
maar de totale hoeveelheid E blijft constant  $\rightarrow E_{\text{pot}} \leftrightarrow E_{\text{kin}}$   
 $\rightarrow \Delta E = E_{\text{in}} - E_{\text{out}}$

## Primaire (fundamentele) groottes (SI)

- [massa] = kg (kilogram)
- [lengte] = m (meter)
- [tyd] = s (second)
- [temperatuur] = K (kelvin)
- [elektrische stroom] = A (ampere)
- [hoeveelheid licht] = cd (candela)
- [hoeveelheid materie] = mol

## Standaard voorvoegsels

$10^{12}$	T (tera)	$10^1$	d (deci)
$10^9$	G (giga)	$10^2$	c (cent.)
$10^6$	M (mega)	$10^3$	m (milli)
$10^3$	k (kilo)	$10^{-3}$	$\mu$ (micro)
$10^2$	h (hecto)	$10^{-6}$	n (nano)
$10^1$	da (deca)	$10^{-9}$	p (pico)

## Secundaire dimensies

- \* Kracht:  $F = m \cdot a$   $[F] = N = \text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$ 
  - $\hookrightarrow$  gewicht  $W(F_g) \rightarrow W = mg$  ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  = valversnelling op aarde)
  - $\hookrightarrow$  massa (onafhankelijk v/d plek)  $\neq$  gewicht (verandert met valversnelling die afhangt v/d locat.)
- \* arbeid:  $W = F \cdot x$   $[W] = J = \text{Nm}$ 
  - $\hookrightarrow 1 \text{ cal} = \text{hoeveelheid energie nodig om temperatuur van } 1 \text{ g H}_2\text{O bij } 15^\circ\text{C met } 1^\circ\text{C te verhogen}$   
 $= 4,1868 \text{ J}$

## Systemen (= hoeveelheid materie of geuren ruimte als studie-object)

- \* omgeving = massa/gelied buiten het systeem
- \* grens = reëel / imaginair oppervlak (afgevind of bewegbaam) dat systeem afscheidt van zyn omgeving

- 1) gesloten systeem: ~~van massa over de openen heen, wel energie~~ geen uitwisseling
- 2) geïsoleerd systeem: noch uitwisseling van massa, noch van energie
- 3) open systeem: transport van energie en massa (grens = controle volume)

- \* intensieve eigenschappen: onafhankelijk v/d ~~van massa over de openen heen, wel energie~~ systeem ( $T, P, \rho$ )
- \* extensieve eigenschappen: afhankelijk v/d grootte v/d systeem ( $m, V$ )
  - $\hookrightarrow$  specifieke eigenschappen: extensieve groottes per massa-eenheid

\*continuum: substantie beschreven als continue, homogene ~~massa~~ zonder gaten  
 ↳ mogelijkheid om eigenschappen te behandelen als punt functies,  
~~maar~~ die geleidelijk veranderen v/d ruimte  
 (lengte v/h systeem  $\gg$  gemiddelde w/e weg voor moleculen)

\*toestand systeem = geheel van eigenschappen die de omstandigheden volledig beschrijven

↳ equilium (evenwicht) = geen (ongebalanceerde) ~~krachten~~ krachten op de systeem aanwezig  
 • thermisch: temperatuur gelijk over het hele systeem  
 • mechanisch: geen drukveranderingen over tijd  
 • fase: elke fase bereikt & blijft op evenwichtsniveau  
 • chemisch: samenstelling wijzigt niet

~~toestandspostulaat~~  
 ↳ toestandspostulaat: toestand v/c eenvoudig samendrukbaar systeem, afwezigheid van effecten tgr externe krachtvelden, wordt volledig gespecificeerd door 2 onafhankelijke (one variabel ten opzichte van de andere) intensieve eigenschappen

\*proces = elke verandering dat systeem ondergaat v/d ene naar de andere evenwichtstoestand

↳ wordt beschreven door initiële & eindtoestand, de weg die het proces aflegt en interacties met de omgeving

• quasi-statisch/equilibrium proces: systeem infinitesimaal dicht bij de evenwichtstoestand

• isothermisch:  $T \text{ const}$

• adiabaat: ~~P~~  $P \text{ const}$

• isochoor: ~~V~~ specifiek volume  $\text{const}$

• cyclisch: ~~P~~ systeem keert terug naar beginstoestand van het v/h proces

• steady-flow: eigenschappen staan mogelijk verschillen van punt tot punt, maar op een bepaald punt moet ze constant blijven  
 (volume  $V$ , massa  $m$ , energieinhoud  $E$  blijven constant)  $\Rightarrow$  intensieve & extensieve eig. gelijk

• adiabatisch: geen warmte-uitwisseling

### Dichtheid

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\rho] = \text{kg/m}^3$$

$$\rightarrow \text{specifiek volume } v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

$$\rightarrow \text{specifieke zwaartekracht / relatieve dichtheid } SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}}$$

(kor standaardgel by bepaalde temperatuur)

$$\rightarrow \text{specifiek gewicht } \gamma_s = \rho g \quad [\gamma_s] = \text{N/m}^3$$

(gewicht ~~per~~ per volume-eenheid v/c oplozing/stof)

## 0<sup>e</sup> wet thermodynamica

2 lichamen in thermisch evenwicht met een derde lichaam, dan zijn ze ook in evenwicht met elkaar

### Temperatuurschaal

- \* Celsius-schaal ] 2-puntskalen bepaald ahdv vries- & kooktemperatuur water
- \* Fahrenheit-schaal ]
- \* Thermodynamische temperatuurschaal (onafhankelijk v/d eigenschappen vle stof)
  - ↳ Kelvin-schaal (absolute temperatuur)
  - ↳ Rankine-schaal
- \* Ideale gas temperatuurschaal : bij lage druk, temperatuur  $\propto$  druk bij constante volume
  - ↳  $T = a + bP$  (a en b experimenteel bepalen)

$$\begin{aligned} \rightarrow T(K) &= T(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \\ \rightarrow T(R) &= T(^{\circ}\text{F}) + 459,67 \end{aligned} \quad \left. \right\} \Rightarrow \Delta T \text{ blijft hielde}$$

\* kipel punt  $\text{H}_2\text{O}$  (3 fasen in evenwicht) = 273,16 K

### Druk (normale kracht uitgeoefend door fluidum per oppervlakte-eenheid)

$$P = \frac{F}{A} \quad [P] = \text{Pa} = \text{N/m}^2$$

$$\begin{cases} 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa} = 0,1 \text{ MPa} \\ 1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa} \end{cases}$$

\* absolute druk = werkelijke druk op een gegeven plek (relatief tot absoluut vacuum)

\* overdruk  $P_{\text{dage}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{atm}}$

\* vacuümdruk  $P_{\text{vac}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{abs}}$

→ scalaire grootheid; varieert met de diepte (niet horizontaal) ijk fluidum want meer vloeistoflagen ligt op dieper gelegen vloeistoflaag  
↳ onafhankelijk v/d vorm of doorsnede

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{dage}} = P_{\text{atm}} + \rho gh$$

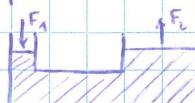
\* vloeistoffen (& gassen) zijn niet samendrukbare stoffen  $\Rightarrow$  variatie dichtheid met diepte is verwaarloosbaar

↳ uitzondering voor vloeistoffen met een niet te verwaarlozen dichtheidverandering in relatie met hoogte / diepte :  $\frac{dP}{dz} = -\rho g \Rightarrow \Delta P = -\int \rho g dz$

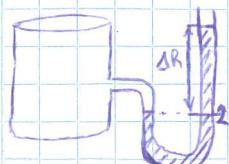
(negatief tiken: positieve z-richting naar boven gericht)

Wet van Pascal : druk ~~uitgeoefend~~ op fluidum verhoogt druk overal met dezelfde hoeveelheid

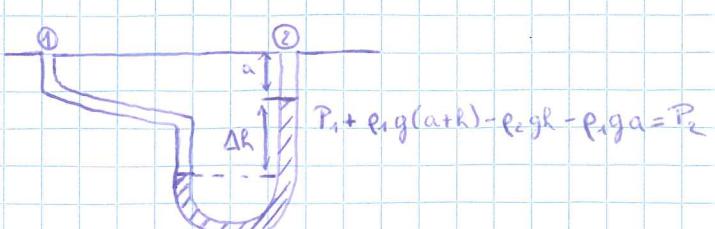
$$P_1 = P_2 \Leftrightarrow \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$



\* manometer : meet drukverschillen vloeistofkolom (diameter groot genoeg om capillariteit te verwaarlozen)



$$P_2 = P_{\text{atm}} + \rho gh$$



- \* barometer = meet v/d atmosferische druk
- \* drucksensor =  $\Delta P \rightarrow$  verandering in spanning, weerstand of capaciteit
- \* overdrukmeters = diafragma, microphone brug
- \* Piero ~~elektrische~~ transducers: genereren elektrische potentiële ~~dielektrische~~ koolstofkristalline stof tgv mechanische druk

$$P_{atm} = \rho gh \rightarrow \text{standaard atmosfeer } (0^\circ\text{C}): \cancel{1013} \text{ mm Hg}$$

$$\cancel{1013} \text{ Pa} \rightarrow 1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr}$$

$$1 \text{ Torr} = 133,3 \text{ Pa}$$

$$F = \frac{\rho g A}{V}$$

Energie

- microscopisch: gerelateerd moleculaire structuur & activiteit  $\Rightarrow$  interne energie U
- macroscopisch: gerelateerd tot beweging & invloeden van externe effecten  
 $\Rightarrow$  kinetische energie (tgv beweging van een puntel)  $KE = \frac{mv^2}{2}$

$\hookrightarrow$  potentiële energie (tgv hoogte of zwaartekrachtveld)  $PE = mgz$

$$E = U + KE + PE \quad [E] = \text{kJ}$$

- \* stationair systeem = gesloten systeem waarvan snelheid & hoogte constant blijven gedurende processen

### Interne energie U (= $\sum$ kinetische, potentiële energie moleculen)

- \* sensibele energie = KE v/d moleculen (translatie, rotatie ~~atom~~, vibratie, spin ( $\epsilon$ ))  
 $\hookrightarrow$  gem. snelheid, graad v/d activiteit  $\sim$  temperatuur
- in relatie met ≠ bindingssituaties
  - \* latente energie = fase v/k systeem
  - \* chemische energie: ~~atom~~ atomaire binding ( $\Delta$  structuur  $e^-$  / atoom)
  - \* kernenergie: sterke bindingen v/d kern v/d atomen ( $\Delta$  v/d kern  $\Rightarrow$  verlies v/d identiteit)
    - $\hookrightarrow$  splitsing = splitsen v/k U-235 nucleon om elektriciteit op te werken
    - $\hookrightarrow$  fusie = 2 kleine kerne combineren tot 1 grote (overwinnen v/d Coulomb afstotingsterreinen v/d kern)
- \* thermische energie = warmteinhoud v/k lichaam (sensibele + latente energie)
- \* mechanische energie = volledig & direct omgezet tot mechanische arbeid door ideale mechanisch systel (turbine)  
 $\hookrightarrow$  KE en PE, niet thermische energie

## ! Energietransport

(1) Waarthe  $Q$ : energie getransporteerd tussen systeem(en) en/of omgeving tgv temperatuursverschil

- **conduktie** = transfer E van een energetische partikel v/d stof ~~naar~~ de aanliggende minder energetische partikels tgv interactie  
Wet van Fourier:  $Q_{cond} = -k_A A \frac{dT}{dx}$  (Temperatuurgradiënt in richting delende T:  $\Theta$ )
- **convectie** = transfer E tussen vast oppervlak en vloeidend medium (staal of gas) (gefaseerd of vrij/natuurlijk) Newton's koelingswet ( $Q_{conv} = hA(T_{opp} - T_{vloestof})$ )
- **radiatie** = transfer E tgv uitzenden van EM-golven (geen medium nodig)  
~~Kondensatoren~~  
~~Thermische isolatie~~  
Wet van Stefan-Boltzmann:  $Q_{emr} = \sigma A T^4$   
Wet van Kirchoff:  $\epsilon = \alpha$  bij gelijke T en  $\lambda$

## ② Arbeid W: (= energietransfer gerelateerd met werkende kracht op afstand)

{ kracht werkzaam o/d grens  
{ grens moet kunnen bewegen  
→ vermogen = arbeid verricht per tydsenheid (W)

### a) Mechanisch

→ Schacht arbeid: Emissie door rotende schacht

\* kracht uitgeoefend door een momentarm genereert torque (constant)

$$\tau = F \cdot R$$

{ R = lengte / straal momentarm

$$* afstand \rightarrow s = (2\pi R) n \quad \{ n: aantal omwentelingen \}$$

$$* W_{sk} = F \cdot s = 2\pi n \tau$$

→ Elastische arbeid

\* Veer (lengte) verandert wanneer er kracht op wordt uitgeoefend

$$\delta W_{veer} = F dx \quad F = kx \text{ (lineaire elastische veer)}$$

$$\hookrightarrow W_{veer} = \int kx \, dx = \frac{1}{2} k(x_2^2 - x_1^2)$$

\* Vaste staven (enkel geldig zolang F < h elastische gelid)  $\Rightarrow$  geen plastische verforming

$$W_{elastisch} = \int F dx = \int \sigma_n A \, dx \quad (\sigma_n = \text{normaalstrek})$$

→ Arbeid gemaatjeerd met rekenen vaste stoffilm

\* overwinnen van microscopische krachten tussen moleculen alh vaste stof - lucht oppervlak (oppervlaktespanning  $\sigma_s$ )

$$W_{opp} = \int \sigma_s \, dA = \int \sigma_s \, 2b \, dx \quad \hookrightarrow \text{2 contactopp met lucht}$$

→ Arbeid om lichaam te  $\left\{ \begin{array}{l} \text{verheffen} \Rightarrow \Delta PE \\ \text{versnellen} \Rightarrow \Delta KE \end{array} \right.$

\* verlies door vrijeval, ---

b) Niet mechanisch (analog behandelen als mechanische vormen: veralgemeende F en x)

→ Elektrisch (elektronen die grens v/c systeem oversteken verrichten werk)

$$W_e = \int V I \, dt \quad \{ V: potentiële verschil / spanning \text{ en } I: stroom \}$$

$$= V I \Delta t \quad \{ I: stroom (\# elctrische lading / tydsenheid) \times x \}$$

→ Magnetisch  $\left\{ \begin{array}{l} \text{magnetfeldsterkte} \\ \text{totale magnetisch dipoolmoment} \end{array} \right.$

→ Elektrisch polarisering  $\left\{ \begin{array}{l} \text{elektrische veldsterkte} \\ \text{polarisatie v/h medium} \end{array} \right.$

## ③ Warmarkoom m

↳ mama draagt energie met zich mee ( $E = mc^2$ )

Gelykenissen energietransfermechanismen tussen systeem en omgeving

→ Warmte & arbeid zijn grens fenomene

→ Systeem bezit energie, niet warmte / arbeid

→ Warmte & arbeid zijn geassocieerd met het proces, niet met toestand v/h systeem (eigenschappen)

→ Warmte & arbeid zijn passfuncties; grootte afhanklik v/d gedachte weg en begin- e eindtoestand

Tekenconventie: warmte transfer naar systeem & arbeid verricht door systeem  $\rightarrow +$   
warmte transfer van systeem & arbeid op het systeem  $\rightarrow -$

→ Pad functie = inexakte differentiaal  $d$

→ Punt functie = exacte differentiaal  $d$



## 1e Wet Thermodynamica

Behoud van energie; energie kan noch gerecreëerd, noch vernietigd worden

Het kan enkel van vorm veranderen (geen onderscheid):

• hoeveelheid - kwaliteit

• warmte transfer - arbeid)

→ Energiebalans:  $\Delta E_{\text{system}} = E_{\text{in}} - E_{\text{out}}$

(energie is een eigenschap; verandert enkel als voorstand  $\Rightarrow$  systeem wijzigt)

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

\* stationaire systemen:  $\Delta E = \Delta U$  ( $\Delta KE = \Delta PE = 0$ )

\* cyclus  $\Delta E_{\text{system}} = E_{\text{final}} - E_{\text{initial}} = 0$

$$\Rightarrow E_{\text{in}} = E_{\text{out}}$$



## Energieconversie

→ efficiëntie voont aan in welke mate energieconversie (transfervoorst) is volbracht

$$\text{efficiëntie } \eta = \frac{\text{gewenste output}}{\text{noodzakelijke input}}$$

\* Verbrandingsrendement  $\eta_{\text{combustion}} = \frac{Q}{HV} = \frac{\text{hoeveelheid warmte afgegeven}}{\text{calorische waarde vd brandstof}}$

↳ calorische waarde (= Heating Value): hoeveelheid warmte afgegeven als eenheid brandstof  
by volledig verbrand & verbrandingsproducten afgekoeld tot Thermoer

↳ LHV:  $H_2O$  verlaat als damp

    HHV:  $H_2O$  verlaat als vloeistof & verdampingswarmte gerecupereerd

↳ efficiëntie verwarmingsystemen in residenties en de AFUE (juarlyks brandstofverbruik)

↳ Motor auto: vermogen geleid door ketting

↳ Elektrische centrale: turbine: mechanisch vermogen

$$\hookrightarrow \eta_{\text{generator}} = \frac{\text{elektrisch vermogen uit}}{\text{mechanisch vermogen in}} = \frac{W_{\text{elektrisch, out}}}{W_{\text{schacht,in}}}$$

$$\hookrightarrow \text{thermische efficiëntie } \eta_{\text{thermal}} = \frac{\text{netto schaftverbijd door turbine}}{\text{warmte input (werk-vloeistof)}} = \frac{W_{\text{net, output}}}{W_{\text{warmte input}}} \quad \text{rotatie warmte input}$$

$$\hookrightarrow \text{globale efficiëntie } \eta_{\text{globaal}} = \eta_{\text{combustion}} \eta_{\text{thermal}} \eta_{\text{generator}} = \frac{W_{\text{net, elektric}}}{{HV \times m_{\text{net}}}}$$

\* verlichtingsefficiëntie = hoeveelheid licht output in lumens

(converie elektriciteit  $\rightarrow$  licht) aantal W elektriciteit verbruikt

\* transfer mechanische energie voornamelijk door rotende schacht  $\Rightarrow$  mechanische = schaft arbeid

↳ mechanische efficiëntie via ketel

$$\eta_{\text{mech}} = \frac{\text{mechanische energie output}}{\text{mechanische energie input}} = \frac{E_{\text{mech,out}}}{E_{\text{mech,in}}} = 1 - \frac{E_{\text{mech,verliezen}}}{E_{\text{mech,in}}}$$

\* Vloeistofsystemen → vervoer van E met pomp  $\Rightarrow P_f, \nu_f$ , ~~verdampen~~ verhogen v/d vloeistof ~~wieken~~

$$\eta_{\text{pomp}} = \frac{\text{Mechanische energie tevraag vloeistof}}{\text{Mechanische energie input}} = \frac{\Delta E_{\text{mech,vloeistof}}}{W_{\text{pomp}}} = \frac{W_{\text{pomp}}}{W_{\text{schacht,inpt}}} = \frac{W_{\text{pomp}}}{W_{\text{schacht}}}$$

$$\rightarrow \text{extractie mechanische energie v/c vloeistof \& produceren mechanisch vermogen}$$

$$\eta_{\text{turbine}} = \frac{\text{Mechanische energie output}}{\text{Mechanische energie afname vloeistof}} = \frac{W_{\text{schacht,out}}}{\Delta E_{\text{mech,vloeistof}}} = \frac{W_{\text{turbine}}}{W_{\text{turbine,extracted}}}$$

\* Conversie elektrische energie naar rotende mechanische energie

$$\rightarrow \eta_{\text{motor}} = \frac{\text{Mechanische vermogen output}}{\text{Elektrisch vermogen input}} = \frac{W_{\text{schacht,out}}}{W_{\text{elektric,in}}}$$

\* Gecombineerde efficiënties: bestellen komen vaak samen voor

$$\rightarrow \eta_{\text{pomp-motor}} = \eta_{\text{pomp}} \cdot \eta_{\text{motor}} = \frac{W_{\text{pomp,useful}}}{W_{\text{elektric,in}}}$$

$$\rightarrow \eta_{\text{turbine-generator}} = \eta_{\text{turbine}} \cdot \eta_{\text{generator}} = \frac{W_{\text{elektric,out}}}{W_{\text{turbine,extracted}}}$$

### Inleid op de natuur

Vervuilde stoffen worden uitgestoten gedurende verbranding fossiele brandstoffen

↳ smog:  $O_3$  (ground-level ozon gevormd door reactie kuis & stikstofoxiden o/cr zonlicht), koolstofmonoxide ( $CO$ ), kleine partikels & VOC's (vluchtige organische componenten)

↳ zure regen: zuur in brandstof reageert met zuurstof tot ~~SO<sub>2</sub>~~  $SO_2$  (luchtpuur)  $SO_2 + NO_2$  reageren met waterdamp (v/d atmosfeer o/cr zonlicht) tot zuur-& stikstof zuren

↳ broeikaseffect:  $CO_2$ , waterdamp e.a. gassen (methaan,  $NO_2$ , ...) blokkieren de weerkaatsende warmtestralen afhankelijk v/d aarde

↳ global warming

### Eigenschappen van zuivere stoffen (= uniforme chemische samenstelling)

#### Fasen

Intermoleculaire bindingen: vaste stof > vloeistof > gas

\* Vaste stof: vaste rooster → moleculen oscilleren rond evenwichtspunt (T afhankelijk)

\* Vloeistof: moleculen niet meer op vaste posities relatief tot elkaar  
↳ vele rotatie en translatie

\* Gas: grote afstand tussen moleculen, die willekeurig bewegen

Verschillende toestanden in evenwicht coëxisteren

① Samengedrukte / ondergedrukte vloeistof ~~→ staat niet stabiel~~

↳ vloeistof gaat niet verdampen

② Verzadigde vloeistof

↳ vloeistof staat op het punt te verdampen (fase-verandering)

③ Verzadigd vloeistof-damp mengsel

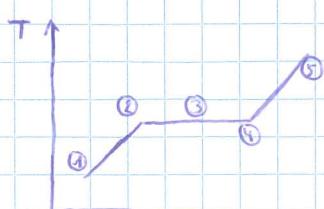
↳ vloeistof en damp coëxisteren in evenwicht

④ Verzadigde damp

↳ damp op het ~~op~~ punt te condenseren

⑤ Overdrukte damp

↳ damp gaat niet condenseren



→ ~~verzadigd~~ verzadigd / temperatuur  $T_{\text{sat}}$

druk  $P_{\text{sat}}$

↳ fase-verandering

→  $P_f \approx T_f$  (moleculen ontgaan minder gemiddeld  $\langle v \rangle_{\text{kin}}$ )  $\cdot T_{\text{sat}} - P_{\text{sat}}$

→ latente warmte = warmte vrijgelaten / geabsorbeerd

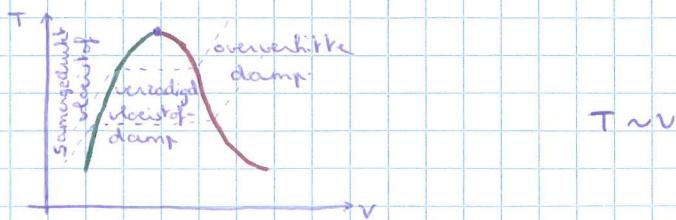
bij fase-verandering

- \* Vacuumkoeling:
  - 1)  $P$  dalen tot  $P_{sat}$  by constante  $T$
  - 2) behouder verzwigde omstandighede by lagere  $P$  en corresponderende lagere  $T$  (tem gewenste  $T$ )

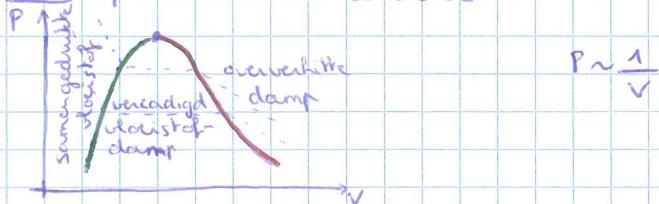
### ! Eigenschapsdiagrammen van faseveranderingen tydens procelle

#### [T-V] (processe met $\neq$ constante $P$ )

- \* kritisch punt = punt waarby verzwigde vloeistof = verzwigde damp
  - ↳ verzwigingslyn wordt steker by grotere druk
- \*  $P > P_{sat}$  : geen onderskeidbare faseverandering
- \*  $T > T_{crit}$  : oververhitte damp
- $T < T_{crit}$  : samengedrukte vloeistof
- \* verzwigde vloeistoflyn : verbinden van alle verzwigde vloeistofpunte
- verzwigde damplyn : verbinden alle verzwigde damppunte

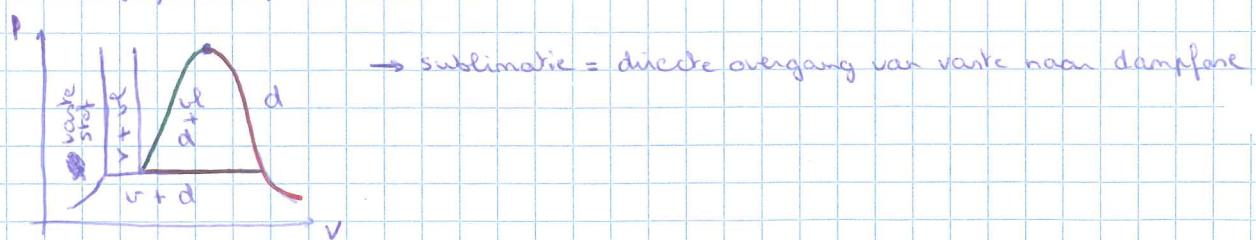


#### [P-V] (processe met $\neq$ constante $T$ )



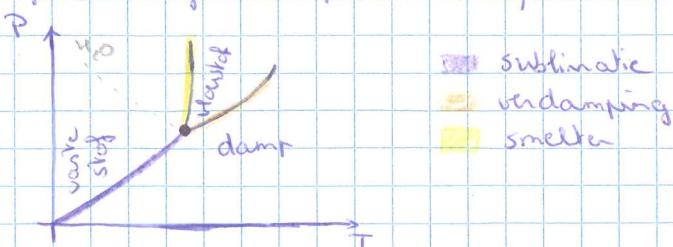
- \* Rekening houdens met varie lage vte stof

- varie stof-vloeistof & varie stof-damp fasen
- meeste stoffe krimpen by oorgang naa varie fase (uitzonding  $H_2O$  uit)
- Triple lyn : alle (3) fasen in evenwicht met elkaan
  - ↳ gelyk  $P$  &  $T$ , verschillende  $V$



#### [P-T]

- fase-diagram : 3 fasen duidelik te onderscheiden



#### [P-V-T oppervlak]

Eenvoudig samendrukbare stof ~~verzwigde damp~~

- ↳ toestand vastgelegd dchr 2 onafhanklike intensieve eigenskappe
- punte op het opp stellen evenwichtsstande voor

#### Enthalpie $\Delta H$

$$H = U + PV$$

$$H = U + PV$$

Index:  $f$  = verzwakte vloeistof  
 $g$  = verzwakte damp  
 $\Delta f_g$  = verschil tussen verzwakte damp en verzwakte vloeistof

### Verzwakte mengsel

kwaliteit $x = \frac{m_{\text{damp}}}{m_{\text{totaal}}}$	(verzwakte vloeistof-damp fase)
---	---------------------------------

→ eigenschappen verzwakte damp/vloeistof blijven gelijk (onafhankelijk van mengsel apart)  
 ↳ beschouwer als homogeen mengsel  $\Rightarrow$  eig v/d mengsel = gemiddelde v/d eig v/d componenten

$$V = V_f + V_g$$

$$(V = mv) \Leftrightarrow m_f V_{\text{avg}} = m_f V_f + m_g V_g$$

$$(m_f + m_g = m_f + m_g) \Leftrightarrow m_f V_{\text{avg}} = (m_f - m_g) V_f + m_g V_g$$

$$\Leftrightarrow V_{\text{avg}} = (1-x) V_f + x V_g$$

$$\Leftrightarrow V_{\text{avg}} = V_f + x V_g$$

$$\Rightarrow x = \frac{V_{\text{avg}} - V_f}{V_g}$$

### Overschotte damp

→ 1 fase gebied:  $P$  en  $T$  onafhankelijke eigenschappen

→ vergelyking voor verzwakte damp:  $P < P_{\text{sat}}$        $u > u_g$

$$T > T_{\text{sat}}$$

$$h > h_g$$

$$v > v_g$$

### Samengedrukte vloeistof

→ Weinig data over relatieve onafhankelijkheid voor druk

↳ benaderen als verzwakte vloeistof bij gegeven temperatuur

→ vergelyking voor verzwakte vloeistof:  $P > P_{\text{sat}}$        $u < u_f$

$$T < T_{\text{sat}}$$

$$h < h_f$$

$$v < v_f$$

Referentiestand wordt gekozen & waarde 0 gegeven (arbitrair)  
(thermodynamica: studie v/d verandering in eigenschappen)

### Toestandsvergelijking (vergelijking die $P, V$ & $T$ relatief)

#### Ideal gas

~~$PV = RT$~~

$$(V = mv) \Leftrightarrow PV = mRT$$

$$(R = R_u / MM) \Leftrightarrow PV = \frac{m}{MM} R_u T = n R_u T \quad (R_u = 8,31 \text{ J/mol K})$$

\* Gasser wyku af van ideale gas naby verzwakingsgebied & kritisch punt

↳ compressibiliteitsfactor  $Z = \frac{Pr}{RT} = \frac{\text{Vactueel}}{\text{V.ideal}}$

~~↳  $Z = \frac{P_{\text{actueel}}}{P_{\text{ideale}}} = \frac{V_{\text{ideale}}}{V_{\text{actueel}}}$~~

\* Gedrag van gasser verskil by gegeven  $T$  &  $P$

$$\hookrightarrow \text{normalisatie } P_{\text{norm}} = \frac{P}{P_{\text{kritisch}}} \quad T_R = \frac{T}{T_{\text{kritisch}}}$$

↳ Principe van corresponderende toestanden:  $Z$ -factor is ~~gelijk~~ voor gasser metzelfde gedurende  $P$  &  $T$

\* Generaliseerde compressibiliteitscurve

→ Gasser gedrag uit ideal: - zeer lage druk ( $P_a \ll 1$ ), onafhankelijk van  $T$   
 - zeer hoge  $T$  ( $T_R \gg 2$ ), onafhankelijk  $P$  (telkere  $P_a \gg 1$ )

→ afwijkking is het grootst v/d buur van kritisch punt

## \* Van der Waals vergelijking

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$$

↳ Rondt rekening met  $\alpha$  - intermoleculaire aantrekkracht

- volume ingenomen door de moleculen zelf

↳ bepalen v/d constante  $a$  &  $b$  adhv:  $\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_{T=T_{krit}} = 0$ ,  $\left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2}\right)_{T=T_{krit}} = \alpha c^{rc}$   
 (buigpunt P-v diagram)  
 adhv gedrag kritisch punt)

Energie analyse: gesloten systeem

Grens arbeid (quasi-evenwichtssituatie)

$$\delta W_b = F ds = PA ds = P dV \rightarrow \begin{cases} + \text{ expansion (arbeid \text{output})} \\ - \text{ compenie (arbeid input)} \end{cases}$$

↳  $W_b = \int P dV$  (hoeveelheid E geabsorbeerd van \& naar systeem gedurende proces)  
 ↳ oppervlakte onder curve van P-V diaogram

\* Polytropisch proces: relatie P en V by expansie / compenie van gasen wordt gegeven door  $PV^n = C$

Energiebalans

→ geen momenteel lancet de grenzen

$$\Delta E_{\text{system}} = Q_{\text{in,ext}} - W_{\text{out,ext}} \Rightarrow \text{warmte geabsorbeerd door systeem}$$

(=  $Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} + W_{\text{in}} - W_{\text{out}}$ )

arbeid door systeem

! Specifieke warmte (= energie nodig om temperatuur v/c massa-eenheid stof te verhogen met  $1^\circ\text{C}$ ) [ $\text{kJ/kgK}$ ]

\* constant volume  $C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$

\* constant druk  $C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P$

→ ideaal gas:  $h = u + Pv$

$$Pv = RT \quad \left. \begin{array}{l} u = u(T) \\ dh = du + RdT \end{array} \right\} \Rightarrow h(T) = u(T) + RT$$

$$\Rightarrow \begin{cases} du = C_v(T) dT \\ dh = C_p(T) dT \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow C_p = C_v + R$$

↳ specifieke warmteverhouding  $\kappa = \frac{C_p}{C_v}$

↳  $C_p > C_v$  - by  $C_v$  druk kan systeem nog uitrekenen  
 (expansie-arbeid toegevoegd a/k systeem)

↳ 3 manieren om  $\Delta u$  &  $\Delta h$  te determineren:

1) tabellen

2)  $C_v$  &  $C_p$  in ~~relatie~~ in functie v/d temperatuur

3) gemiddelde specifieke warmte

→ Vaste stof & vloeistof = niet samen drukbaar ( $\Rightarrow v = c^{rc}$ )

$$h = u + Pv$$

$$\Leftrightarrow dh = du + v dP + P dv = du + v dP$$

↳ vaste stoffen:  $v dP$  is verwaarloosbaar  $\Rightarrow \Delta h = \Delta u \approx C_{avg} \Delta T$

↳ vloeistoffen: - processen met  $c^{rc} P$  (bv verwarmen)  $\Rightarrow \Delta P = 0 \Rightarrow \Delta h = \Delta u \approx C_{avg} \Delta T$   
 - processen met  $c^{rc} T$  (bv pompen)  $\Rightarrow \Delta T = 0 \Rightarrow \Delta h = v \Delta P$

## Massa en energie analyse: continue stroom

### Behoud van massa

- \* massa kan noch gerecreerd, noch vernietigd worden, het kan wel weder omgezet in energie (*et vice versa*)  $\Rightarrow E = mc^2$
- \* netto transfer naar/van continue volume hydriestroom  $\Delta t$  is gelijk aan de netto verandering v/d totale massa i/h continue volume hydriestroom  $\Delta t$
- ↳ massa balans:  $\Delta m_{cv} = m_{in} - m_{out}$  ( $m_{tot, cv} = \int_{cv} \rho dV$ )

↳ steady flow proces ( $m_{tot, cv} = \text{constant}$ ):  $\sum_{in} \dot{m} = \sum_{out} \dot{m}$  (massa in = massa uit)

↳ voor een enkele stroom:  $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$  (massa flow rate)

$$\Leftrightarrow P_1 V_1 A_1 = P_2 V_2 A_2$$

↳ met samenhoudbare vloeistof (steady flow):  $\sum \dot{V}_{in} = \sum \dot{V}_{out}$

↳ enkel stroom:  $\dot{V}_1 = \dot{V}_2$  (volume flow rate)

$$\Leftrightarrow V_1 A_1 = V_2 A_2$$

### Stroom arbeid (= arbeid nodig om massa in uit continue volume te dragen)

$$F = PA \Rightarrow W_{\text{flow}} = F \cdot L = P \cdot A \cdot L = PV$$

\* vloeistof die continue volumen binnen gaat / buiten brengt "stroom energie Pv"

↳ totale energie vloeistof per massa-eenheid  $\Theta = Pv + e = Pv + (u + ke + pe)$

$$(h = u + Pv) \Leftrightarrow \Theta = h + ke + pe$$

$$= h + \frac{v^2}{2} + g z$$

~~→ totale hoeveelheid energietransport per unit time~~

$$\rightarrow \text{totale hoeveelheid energietransport } E_{\text{massa}} = m \Theta$$

### Energie analyse steady flow systeem

$$E_{cv} = \text{constant} \Rightarrow \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{\text{system}}}{dt} = 0$$

$$\Leftrightarrow \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$(\text{energie gehandhaafd door} \quad \Leftrightarrow \dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum \dot{m} \Theta_{in} = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum \dot{m} \Theta_{out})$$

$$\text{↳ richting interacties kunnen} \Leftrightarrow \dot{Q} - \dot{W} = \sum_{out} \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_{in} \left( h + \frac{v^2}{2} + \cancel{gz} \right)$$

(rekenconventie)

~~→~~

$$\text{Benthele stroom: } q - w = h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

( $\Delta P \approx 0, \Delta E \approx 0$  verwaarloosbaar)  $\Leftrightarrow q - w = h_2 - h_1$

$q =$  snelheid warmteoverdracht tussen continue volume & omgeving

( $\Theta \Rightarrow$  warmteverliez,  $0 \Rightarrow$  adiabatisch, goed geïsoleerd cv)

$w =$  vermogen

$\Delta h =$  verandering enthalpie

$\Delta ke =$  kinetische energie (steady flow:  $v_1 \approx v_2$ )

$\Delta pe =$  potentiële energie (zeer klein hoogteverschil tussen ingang & uitgang)

a) Nozzle  $\Rightarrow$  snelheid vloeistof ↑



Difusor  $\Rightarrow$  druk vloeistof ↑ (snelheid ↓)



b) Turbine  $\Rightarrow$  vermindrukt arbeid: vloeistof verliest arbeid tegen bladen die vastgehecht zijn aan schacht waardoor deze gaan roteren

vermogen  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Compressor} \Rightarrow \text{gas samendrukt tot hoge druk} \\ \text{Pomp} \Rightarrow \text{vloeistof samendrukt waardoor druk stijgt} \end{array} \right.$

input nodig  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Ventilator} \Rightarrow \text{verhoogd druk levert waardoor gas wordt voortgestuurd} \end{array} \right.$

c) Smoeklepper ("throttling valve"): stroom verhinderende ketel waarde druk drastisch daalt

d) Mengketel: mengen van 2 verschillende stromen van vloeistof

e) Warmte uitwisselaars: 2 bewegende vloeistoffen wisselen warmte uit zonder te mengen

f) buizen & kokers (met uitzondering vid hydraulisch opstartings- & afsluitingsperiodes)

### Energie analyse unsteady flow systeem (transient flow)

→ verandering in het continue volume over bepaalde tyd

\* procesen starten & eindigen over bepaalde, eindige tydperiode

\* statische systemen; gefixerd i/d ruimte, maar grotter kunnen bewegen

→ benaderen als ~~een~~ uniforme stroom proces:

De vloeistofstroom aan elke ingang en uitgang is uniform & steady (kalm, gestadig), eigenschappen vid vloeistoffen veranderen dus niet met de tyd of positie  $\Rightarrow$  dwarsdoorsnede. Indien deze wel veranderen, worden ze uitgemiddeld en behandeld als constante gedurende het hele proces

$$\text{Ls} (Q_{\text{in}} + W_{\text{in}} + \sum m\delta) - (Q_{\text{out}} + W_{\text{out}} + \sum m\delta) = (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{\text{system}}$$

$$(\theta = h + k_e t + p_e) \Leftrightarrow Q - W = \sum_{\text{out}} m h - \sum_{\text{in}} m h + (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{\text{system}}$$

(Steady flow & uniform flow processen gedateerd, kunnen redelijk goed benaderd worden)

### ! 2<sup>e</sup> Wet van de Thermodynamica

Energie heeft zowel kwantiteit als kwaliteit (onderscheid warmte trans. & entropie transf.)

↳ (verhoogde theoretische efficiëntie limiter  $\rightarrow$  arbeid  $\approx$  geen entropie transfer) voorspellen voltooingsgraad chemische reacties

① Kelvin-Planck: het is onmogelijk voor een ketel dat cyclisch operert om warmte te ontvangen vte enkel & netto hoeveelheid arbeid  $\rightarrow$  re produceren reservoir

b) geen enkele warmte motor bezit efficiëntie van 100% (warmte ophalen in noodzakelijkt)

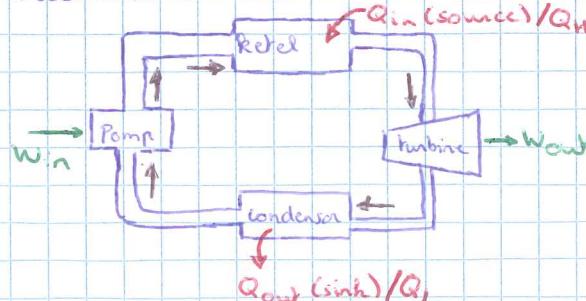
② Clausius: het is onmogelijk om een ketel te bouwen dat i/c cyclus operert en enkel warmte trans. vte lage temperatuur naar een hoge temperatuur te verwervelen  
↳ equivalentie verklaringen met gelijkaardige gevolgen

Thermische energie reservoir: hypothetisch lichaam met relatief grote thermische energie capaciteit ( $m \times c$ ), dat een enige hoeveelheid warmte kan aanvoeren/absorberen zonder temperatuursverandering te ondervangen. Ls ~~sources~~ ~~sink~~

### Warmte motor (→ warmte omzetten naar arbeid)

- ontvangen warmte van hoge temperatuur bron/source
- gedeelte van deze warmte omzetten naar arbeid
- verminderen overblijvende warmte naar lage temperatuur sink
- cyclisch (werkfluum) ~~closed~~

### vb) Stoomkrachtcentrale (externe verbrandingsmotor)



$Q_{\text{in}} =$  warmte geleverd al/d stoom i/d ketel door hoge temperatuur source

$Q_{\text{out}} =$  warmte verwijderd door stoom condensator naar lage temperatuur sink

$W_{\text{out}} =$  arbeid geleverd door stoom warmen deze expandend

$W_{\text{in}} =$  arbeid nodig om water samen te drukken tot ketel

$$\Leftrightarrow W_{\text{in},\text{out}} = W_{\text{out}} - W_{\text{in}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}$$

{ verbonden componenten beschouwen als gesloten systeem

cyclisch gesloten systeem.  $\Delta U = 0$

$$\text{thermische efficiëntie } \eta_{th} = \frac{W_{net,in}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

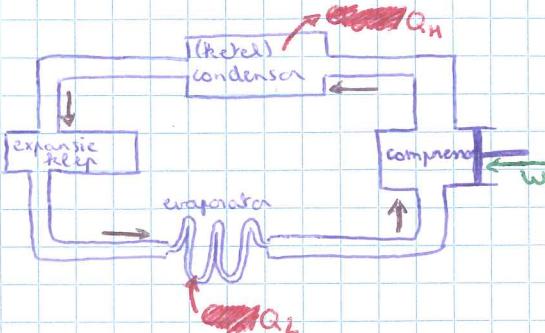
- { \* warmte verwijderingsproces ( $Q_{out}$ ) is noodzakelijk voor het voltooien v/d cyclus  
 { \* warmte wordt steeds v/c hoge temperatuur medium naar lage temperatuur medium getransfereerd  
 ↪ "waste energy"

### ! Koelapparatuur & warmtepompen

→ warmteoverdracht v/c lage temperatuur medium naar hoge temperatuur medium

#### vbl ① Koelapparaat (werkfluïdum = refrigerant) ↪

↳ gekoelde ruimte als lage temperatuur houden door warmte te verwijderen



\* refrigerant als damp naar compresor:

↳ samengedrukt tot hoge temperatuur & P compresor  
 condensator → afleiden warmte  
 ↳ condensator door passage langs speciaal v/d

\* smeerkoepel effect  $\Rightarrow P \& T \rightarrow$

\* refrigerant verdampft v/d evaporator door  
 warmte opname v/d gekoeld ruimte

$$\rightarrow \text{Prestatiecoëfficiënt COP_R} = \frac{\text{gewenste output}}{\text{noodzakelijke input}} = \frac{Q_L}{W_{net,in}}$$

$$(W_{net,in} = Q_H - Q_L) \Leftrightarrow COP_R = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1}$$

#### ② Warmtepomp

↳ verwarmde ruimte als hoge temperatuur houden

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} \Leftrightarrow COP_{HP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

$$\Leftrightarrow COP_{HP} = COP_R + 1$$

\* efficiëntie wordt ook vaak weergegeven door:

- energie efficiëntie ratio EER

- seculair energie efficiëntie ratio SEER

### Prijselium mobile koelkasten

Machines die de 1<sup>e</sup> wet (PPM 1) of de 2<sup>e</sup> wet (PPM 2) v/d thermodynamica schender

Reversibele processen = proces kan omgedraaid worden zonder en spoed op de omgeving na te lateren

- { → intern reversibel: er komen geen irreversibiliteiten v/c binnen de grenzen v/d systeem gedurende het proces  
 { → extern reversibel: geen irreversibiliteiten buiten de grenzen v/d systeem tydens proces  
 ↪ (totaal) reversibel

Irreversibele processen = proces die niet omkeerbaar zijn o/c irreversibiliteiten

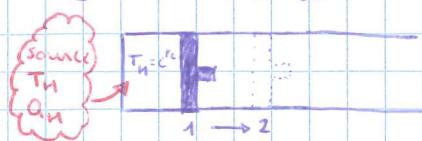
bv: verwarming (opverwarming opp.)

ongereerde expansie v/c gas

warmteverlies door eindig temperatuursverschil

! **Carnot cycle** (reversibele cycle: Wett maximaliseren door gebruik processen die minste werk nodig hebben & meeste arbeid leveren)

→ Carnot warmte motor ( $\leftrightarrow$  Carnot koelingscycle):



① Reversibele isotherme expansie: gas ( $T_H$ ) breidt zich langzaam uit, en ~~verwarmt~~

Hierdoor verlaagt de temperatuur v/h gas ( $dT$ ), waardoor warmte wordt toegevoegd aan reservoir  
↳ proces gaat door van positie 2 in bereikt

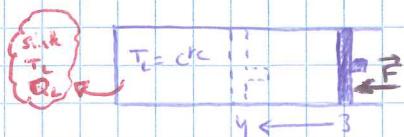
② Reversibele adiabatische expansie: reservoir wordt weggehaald & verwanger door insluitend materiaal



↳ gas expandeert (wrijvingplaats  $\Rightarrow$  quasi-equilibrium)  
↓ temperatuur gas daalt  
(isenstropisch)

③ Reversibele isotherme compresie: isolerend materiaal & gas wordt ingedrukt door

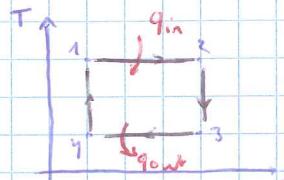
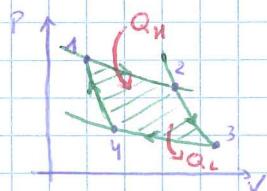
↳ externe kracht, temperatuur zal stijgen ( $dT$ ), warmte wordt afgevoerd naar reservoir  
~~verwarmt~~



④ Reversibele adiabatische compresie: isolerend materiaal wordt teruggeplaatst, tijdens compresie zal temperatuur v/h gas opnieuw stijgen  
(isenstropisch)



\* Grens arbeid voor quasi-equilibrium processen weergegeven als opp onder  $\Rightarrow$  curve v/d P-V diagram



! \* **Carnot principie:** → efficiënte irreversibele warmte motoren lager dan reversible wanneer deze werkzaam zijn tussen dezelfde twee reservoirs  
→ efficiëntie van alle reversible warmte motoren is gelijk arbeukzaam ~~in~~ tussen dezelfde 2 reservoirs (zelfde temperatuurminten  $T_L$  en  $T_H$ )

\* Carnot efficiëntie = hoogste mogelijke efficiëntie vle warmte motor werkzaam tussen 2 reservoirs ( $T_H$  en  $T_L$ )

$$\eta_{rh, rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$(\eta_{rh} = 1 - \frac{Q_E}{Q_H})$$

$$\hookrightarrow \eta_{rh} \begin{cases} < \eta_{rh, rev} & \text{irreversibele warmte motor} \\ = \eta_{rh, rev} & \text{reversibele} \\ > \eta_{rh, rev} & \text{onmogelijk} \end{cases}$$

$$COP_{R, rev} = \frac{1}{T_H/T_L - 1}$$

$$; \quad COP_{ip} = \frac{1}{1 - T_L/T_H}$$

↳ hoogst mogelijke prestatiecoëfficiënten vle koelingsapparaat/warmte pomp werkzaam tussen temperatuurminten  $T_L$  en  $T_H$

$$\Rightarrow COP_R \begin{cases} < COP_{R, rev} & \text{irreversibele koelingsapparaat} \\ = COP_{R, rev} & \text{reversibel} \\ > COP_{R, rev} & \text{onmogelijk} \end{cases}$$

### Kwaliteit van energie

→ hoe hoger de temperatuur, hoe beter de kwaliteit van energie

↳ verspilling van energie = conversie naar een minder nuttige energie vorm

→ daling kwaliteit geassocieerd met stijging entropie (gedraaide posities) waarbij kwantiteit ↑

## Entropie (= hoeveelheid E niet beschikbaar voor arbeid; maat voor wanorde)

**Clauinius ongelijkheid**:  $\oint \frac{\partial Q}{T} \leq 0$  (geldig voor alle cycli)

→ leidt tot definitie v/d entropie

\* Intern reversibele cyclus:  $\oint \left( \frac{\partial Q}{T} \right)_{\text{int rev}} = 0$

↳ grootte, waarvan integraal gelijk aan 0, is enkel afhankelijk v/d toestand vte systeem (niet v/d afgelegde weg)  $\Rightarrow$  eigenschap: (totale) entropie S (extensief eig.)

$$dS = \left( \frac{\partial Q}{T} \right)_{\text{int rev}} \Rightarrow \Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left( \frac{\partial Q}{T} \right)_{\text{int rev}} \quad (\text{kJ/K}) \\ \left( = \frac{Q}{T_0} \text{ (inhoud warmte transfer)} \right)$$

**Principe v/d stijgende entropie**: entropie geïsoleerd systeem (bv universum) stijgt altijd, of constant bij reversibele processen

$$\begin{array}{ccc} & \text{intern reversibel} & \\ 1 & \xleftarrow{\text{---}} & 2 \\ \text{intern reversibel} & & \end{array} \quad \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} + \int_2^1 \left( \frac{\partial Q}{T} \right)_{\text{int rev}} \leq 0$$

$$\Leftrightarrow \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} + S_1 - S_2 \leq 0$$

$$\Leftrightarrow \Delta S = S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} \quad (\text{entropieverandering systeem}) \quad \left( dS \geq \int \frac{\partial Q}{T} \right) \\ (\text{entropieverandering}) \quad 1 \quad (\text{entropie transfer})$$

\* ongelijkheid: entropieverandering geïsoleerd systeem tydens irreversibele proces is altijd groter dan entropie transfer

↳ entropie wordt gegenereerd tydens irreversibele proces (o.vr irreversibiliteiten):  $S_{\text{gen}}$

$$\Delta S_{\text{sys}} = \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} + S_{\text{gen}}$$

\* geïsoleerd systeem (geen warmte transfer):  $\Delta S_{\text{totaal}} \geq 0$

↳ geen entropie transfer:  $S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{totaal}} = \Delta S_{\text{systeem}} + \Delta S_{\text{omgaing}} \geq 0$

$$S_{\text{gen}} \begin{cases} > 0 & \text{irreversibel proces} \\ = 0 & \text{reversibel} \\ < & \text{onmogelijk} \end{cases}$$

\* entropie bereikt maximum bij evenwichtstoestand

↳  $\left\{ \begin{array}{l} \text{processen hebben bepaalde richting} \quad (S_{\text{gen}} \geq 0) \\ \text{entropie is een niet geconserveerde grootheid} \\ \text{entropie generatie is een maat voor de grootte v/d irreversibiliteiten} \end{array} \right.$

\* isentropisch proces: intern reversibel & adiabatisch, entropie vte varie manier veranderd niet gedurende proces

\* voor elke macroscopisch evenwichtstoestand zijn er verschillende microscopische toestanden van moleculaire configuraties mogelijk (thermodynamische probabilité p)

↳ Boltzmann relatie:  $S = k \ln p$

## 3<sup>e</sup> Wet van de Thermodynamica

Entropie vte pure Kristallijne stof by o.K is gelijk aan 0 omdat er geen onzekerheid bestaat over over de toestand v/d molecule

$\Rightarrow$  absolute entropie (referentie)

## Gibbs' vergelyking

$$\begin{aligned} dU &= \partial Q_{\text{int}, \text{new}} - \partial W_{\text{int}, \text{new}} \\ \left\{ \begin{array}{l} \partial Q_{\text{int}, \text{new}} = T ds \\ \partial W_{\text{int}, \text{new}} = P dV \end{array} \right\} \Leftrightarrow T ds &= dU + P dV \quad \rightarrow ds = \frac{du}{T} + P \frac{dv}{T} \\ (h = u + Pv) \quad \Leftrightarrow T ds &= dh - v dP \quad \rightarrow ds = \frac{dh}{T} - v \frac{dP}{T} \end{aligned}$$

\* niet samendringbare stoffen (vaste stoffen, vloeistoffen)

$$\hookrightarrow ds = \frac{du}{T} = \frac{cdT}{T}$$

$$\Leftrightarrow \Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 c(T) \frac{dT}{T} \approx c_{\text{avg}} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

\* ideale gassen

$$\hookrightarrow ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow s_2 - s_1 &= \int_1^2 c_v(T) \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \\ &= \int_1^2 c_p(T) \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \end{aligned}$$

## Isoentropische processen ideale gassen ( $\Delta s = 0$ )

$$\hookrightarrow * \text{ constante specifieke warmte} = \ln \frac{T_2}{T_1} = -R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$\Leftrightarrow \ln \frac{T_2}{T_1} = \ln \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{R/c_v}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R = c_p - c_v \\ k = \frac{c_p}{c_v} \end{array} \right.$$

$$\Leftrightarrow \left( \frac{T_2}{T_1} \right)_{s=c^{\text{re}}} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$

$$\text{of } \left( \frac{T_2}{T_1} \right)_{s=c^{\text{re}}} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k}$$

$$* \text{ variabele specifieke warmte} = s_2^\circ = s_1^\circ + R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$\Rightarrow \left( \frac{P_2}{P_1} \right)_{s=c^{\text{re}}} = e^{\frac{(s_2^\circ - s_1^\circ)}{R}} = \frac{e^{s_2^\circ/R}}{e^{s_1^\circ/R}} = \frac{P_{R2}}{P_{R1}} \quad (P_R = \text{gedreundeerde druk})$$

$$\left( \frac{v_2}{v_1} \right)_{s=c^{\text{re}}} = \frac{v_{R2}}{v_{R1}} \quad (v_R = \text{gedreundeerd volume} = T/P_R)$$

Entropie balans  
(entropie kan ~~zich~~ <sup>maar niet</sup> veranderen, moet veranderd worden: 2<sup>e</sup> wet thermodynamica)

~~ΔS~~  $\Delta S_{\text{system}} = S_{\text{in}} - S_{\text{out}} + S_{\text{gen}}$

\* Transfermechanismen

① Warmte is een vorm van ongeorganiseerde energie

$$S_{\text{heat}} = \frac{Q}{T} \quad (T = \text{const}, \text{als } T \text{ variaal: integraal})$$

→ arbeid in "entropie-vrij":  $S_{\text{work}} = 0$

② Massastransfer

→ entropie (de energie) zijn proportionaliteit de massa v/c systeem

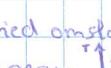
$$S_{\text{mass}} = m s$$

\* Entropie generatie  $S_{\text{gen}}$ : irreversibiliteiten

Vermogenscyclici

Ideale cyclus (volledig opgebouwd uit intern reversibele processen, niet noodzakelijk extern reversibel)

{ glijdingspel: (werkfluidum ondergaat geen drukverval in buizen)  
expansie/compressie gebeurt ~~op~~ op quasi-evenwichtige manier  
goed gesloten buizen die de componenten verbinden (warmteaanvoer verwaarloosbaar)  
verwaarlozen v/d ΔKE & ΔPE van werkfluidum

\* Thermische efficiëntie  $\eta$  { - ratio gehied omlopen door cyclischecurve / gehied onder warmteadditieve proces  
(T-s diagram ))  
- stijging gemiddelde temperatuur aan warmte toehangende  
- daling gemiddelde temperatuur warmte die is verworpen

\* Lucht-standaard ~~veronderstellingen~~:

1) werkfluidum = lucht (continue circulatie (te geraden hing))

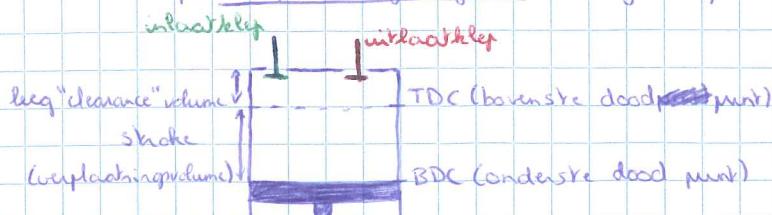
2) intern reversibele processen

3) verwarmingsproces vervangen door warmteadditieve proces v/c externe bron

4) uitlaatproces vervangen door warmteverweerpingsproces dat werkfluidum herstelt naar oorspronkelijke toestand

(5) lucht heeft constante specifieke warmte bepaald by Thermo: konde lucht-standaard veronderstelling)

~~Reciprocating engine~~ (zuiger-cylinder toets)



$$\text{compressie ratio } n = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} = \frac{V_{\text{BDC}}}{V_{\text{TDC}}}$$

\* gemiddelde effektieve druk MEP: fictieve druk, die indien op de zuiger werkte gedurende de gehele vermogenstag, eenzelfde totaalbedrijf  $W_{\text{net}}$  zou produceren als tydens actuele cyclus

$$MEP = \frac{W_{\text{net}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} \quad (\text{kPa})$$

↳ parameters om verschillende reciprocating engines van gelijke ~~grootte~~ grootte te vergelijken

## ① Elektrische ontsteking (SI) motoren

(benzine motor met carburator voor meger lucht & brandstof/benzine)

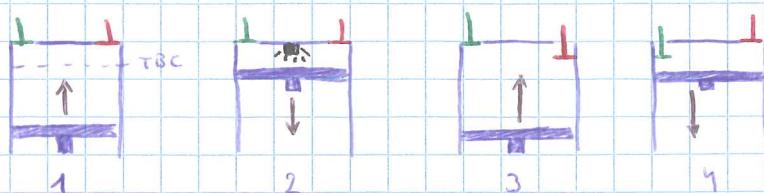
\* ~~4-takt (interne verbrandings) motor (2 revolutionen v/d krukas / thermodynamische cyclus):~~

1) Compressie slag: zuiger wordt naar boven geduwd waardoor lucht-brandstof mengsel wordt samengeperst

2) Vermogensslag (expansie): ~~zuiger~~ zuiger wordt naar beneden geduwd doordat ontstekingspunt wordt afgestoken wanneer TDC bereikt, hierdoor stijgt de temperatuur & druk, de krukas gaat draaien, waardoor netto (nuttige) arbeid wordt geleverd

3) Uitlaat slag: zuiger beweegt naar beneden toe om uitlaatgassen te laten ontsnappen

4) Innameslag: vers lucht-brandstof mengsel wordt opgenomen waardoor zuiger naar beneden wordt geduwd



~~→ begrensd door de zuigervierkant~~

~~→ begrensd door de uitlaatvleugel~~

\* tweedakt motor

1) Vermogensslag

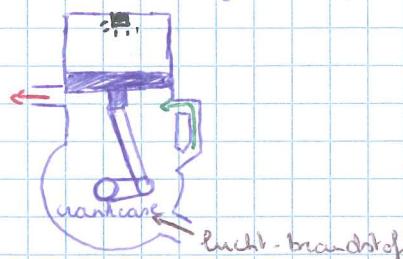
2) Compressie slag

→ uitwaarde beweging v/d zuiger zorgt voor een lichte drukverhoging v/d crankcase

→ in- & uitlaatkleppen verwijderd door openingen

↳ uitlaatopening wordt eerst blok gesteld waardoor uitlaatgassen kunnen worden verdriven, na dat daarna blockstelling inlaatopening & daardoor uitlaatgassen buiten

↳ gedeeltelijke menging lucht-brandstof & uitlaatgassen: minder efficiënt



## Otto cyclus (gesloten systeem)

1 → 2 isentropische compressie

2 → 3 constante volume warmte-toevoering

3 → 4 isentropische expansie

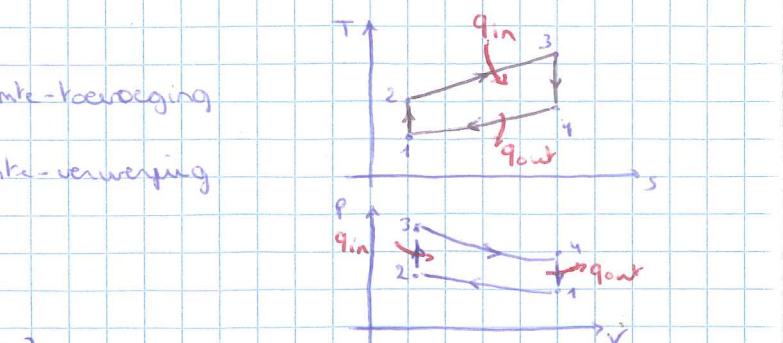
4 → 1 constante volume warmte-verwijding

$$\eta_{th, \text{Otto}} = 1 - \frac{1}{R^{k-1}}$$

$$\Delta h = (q_{in} - q_{out}) - (w_{out} - w_{in})$$

$$q_{in} = u_3 - u_2 = c_v (T_3 - T_2)$$

$$q_{out} = u_4 - u_1 = c_v (T_4 - T_1)$$



\* 1 → 2 isentropisch

$$\left. \begin{array}{l} 3 \rightarrow 4 \text{ isentropisch} \\ v_2 = v_3 \\ v_4 = v_1 \end{array} \right\} \frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \left( \frac{v_n}{v_3} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \frac{T_4}{T_3}$$

\* **spontane ontbranding**: hoge compressieverhoudingen, waardoor lucht-brandstof mengsel een hoge temperatuur kan bereiken, zodat deze voor de ontstekingspistool al wordt verbrand, gevolgd door spontane verbranding v/d rest v/h gas. dit produceert een zeer enige klank (engine knock)

↳ verbeteren  $\eta_{th}$  door hogere compressieverhoudingen: gelimiteerde R  
↳ verbinderen kloppen v/d motor

### ② Compressie ontstekingsmotoren (CI)

→ zelfontbranding door samendrukken (lucht-brandstof mengsel temperatuur hoger dan spontane ontbranding)

↳ mogelijkheid tot spontane ontbranding geelimineerd omdat enkel

lucht wordt samengedrukt (diesel motor): optere R mogelijk  $\Rightarrow$  efficiënter

↳ **langdurig** verbrandingsproces: brandstof bewegen warmen wijn TDC nader & tydens 1e del v/d vermogenstuig  
↳ grotere ververing: in samengedrukte

tot kleinere deeltjes

waardoor

brandstofopp  $\uparrow$

(meer hoge stoffen als uitlaat, slecht voor milieu)

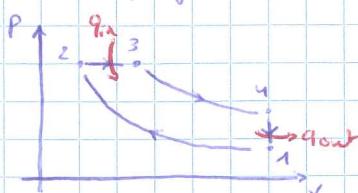
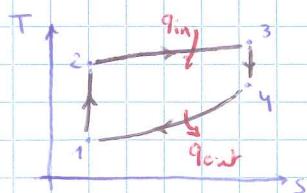
### Diesel cyclus

1 → 2 isentropische compressie

2 → 3 constante druk warmte-verwarming

3 → 4 isentropische expansie

4 → 1 constante volume warmte-verwering



$$\text{* cut-off ratio } R_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{V_{\text{na verbranding}}}{V_{\text{voor verbranding}}}$$

$$\eta_{th, \text{Diesel}} = 1 - \frac{1}{R^{k-1}} \left( \frac{R_c^k - 1}{k(R_c - 1)} \right)$$

↳ efficiëntie v/d diesel cyclus stijgt als cut-off ratio daalt

$$\Rightarrow \eta_{th, \text{Otto}} > \eta_{th, \text{Diesel}}$$

(indienzelfde compressieverhouding)

### ? Stirling en Ericsson cyclus

→ geheel/totale reversibele processen

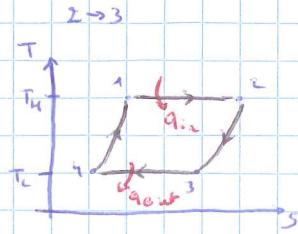
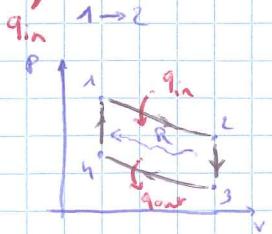
\* regeneratie: warmteoverdracht naar thermisch energie-opslag tankel ( $\neq$  isentropisch)

(voordel) → **extreem verbranding**: verschillende brandstofbronnen, meestijd voor verbranding, gesloten cyclus (bv zonnependel)

### Stirling cyclus

↳ compleet: minder uitlaatvervuiling

- 1 → 2: isotherme expansie: warmte additie door externe bron/source
- 2 → 3: isochore regeneratie: interne warmte transfer dr. werkfluidum na regenerator
- 3 → 4: isotherme compressie: warmte verwering naa exterieur sink
- 4 → 1: isochore regeneratie: interne warmte transfer van regenerator naa werkfluidum



$$Q_{\text{net}} = 0 \Rightarrow \text{E-hoeveelheid opgeslagen regenerator v/d cyclus (2-3)}$$

= E-hoeveelheid opgenomen dr. werkfluidum (4-1)

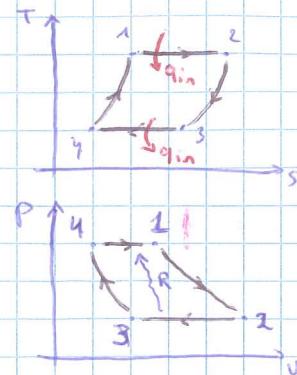
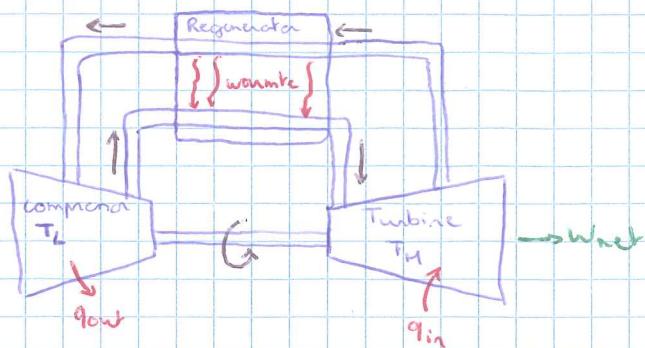
## Eriksen cyclus

$1 \rightarrow 2$ : isotherme expansie (turbine)

$2 \rightarrow 3$ : isobare regeneratie

$3 \rightarrow 4$ : isotherme compressie (compressor)

$4 \rightarrow 1$ : isobare regeneratie



\* Tgr cannot principle  $\Rightarrow$  self-destruction efficiency has a self-destruction temperature limit:

$$\Rightarrow \eta_{th, \text{reducing}} = \eta_{th, \text{max}} = \eta_{th, \text{cannot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

## Gasturbine motoren

$\rightarrow$  meestal werkzaam via open cycle (verse lucht  $\rightarrow$  uitlaatgassen)

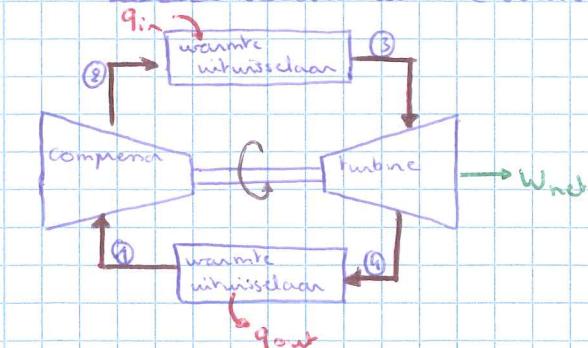
## ! Brayton cyclus (gesloten laring, intern reversibel)

$1 \rightarrow 2$ : isentropische compressie (compressor)

$2 \rightarrow 3$ : isobare warmte additie

$3 \rightarrow 4$ : isentropische expansie (turbine)

$4 \rightarrow 1$ : isobare warmte verwijding



$$\star \text{ druk ratio } R_p = \frac{P_2}{P_1}$$

\* energiebilans ( $\Delta p_{hc}, \Delta p_{pe}$  verwaarloosbaar):  $(q_{in} - q_{out}) - (w_{net} - w_{in}) = R_{uit} - R_{in}$

$$a) q_{in} = R_2 - R_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

$$b) q_{out} = R_{uit} = c_p(T_4 - T_1)$$

$$\eta_{th, \text{Brayton}} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

$$\left\{ \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(k-1)/k}{(k+1)/k}} = \left( \frac{P_2}{P_4} \right) = \frac{T_3}{T_4} \right\}$$

$$\Leftrightarrow \eta_{th, \text{Brayton}} = 1 - \frac{1}{R_p^{(k-1)/k}}$$

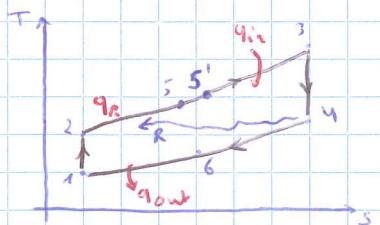
\* lucht in gasturbines  $\Rightarrow$  levert noodzakelijke zuurstof voor verbranding  
 $\Rightarrow$  dient als houder om temperatuur v/d verschillende componenten binnen veilige limieten te houden

\* verdere ontwikkeling gasturbines  $\Rightarrow$  verhoogde turbine inlaat temperatuur  
 ↳ ontwikkeling nieuwe materialen  
 ↳ innovatieve koelingstechnieken  
 → verhogen efficiëntie v/d componenten van turbomachines  
 ↳ aerodynamisch met minimale verliezen  
 → toegemodificaties v/d basis cyclus  
 ↳ inbouwen van interkoeling, regeneratie, opverwarming (reheating)

\* afwijking actuele gasturbine cyclus tot ideale Brayton cyclus  
 ↳ drukverval tydens warmte toevoering & verliesping  
 ↳ irreversibiliteiten  $\Rightarrow$  hogere werk input naar compressor  
 ↳ laagere werk output door turbine  
 → rekening houden met afwijzend gedrag dmz niet-ideale efficiëntie turbine & compressor

### Brayton cyclus met regeneratie

→ hoge druk-lucht afkomstig v/d compressor kan worden opgewarmd door warmteoverdracht v/d hete uitlaat gassen dmz regenstroomb warmte uitwisselen (= regenerator)  
 ↳ stijging thermische efficiëntie tot regeneratie, deel energie v/d uitlaatgassen dat normaal wordt verworpen, wordt gebruikt om lucht \* voor te warmen vooraleer het v/d verbrandingskamers bereikt komt

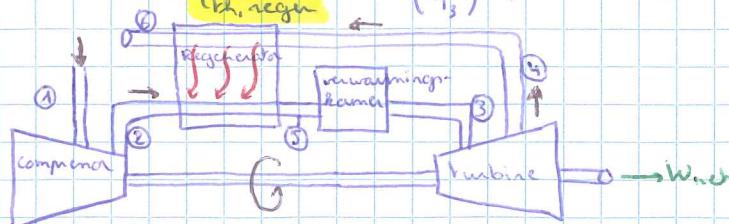


$$\begin{cases} q_{R,act} = h_5 - h_4 \\ q_{R,max} = h_{5,i} - h_2 = h_4 - h_2 \end{cases}$$

$$\text{efficiëntie } \epsilon = \frac{q_{R,act}}{q_{R,max}} = \frac{h_5 - h_2}{h_{5,i} - h_2} \quad (\text{mate waarin ideale regenerator wordt behaald})$$

$\hookrightarrow$  houdt lucht standaard veronderstellingen:  $\epsilon = \frac{T_5 - T_L}{T_4 - T_L}$

$$\hookrightarrow \eta_{bh, regen} = 1 - \left( \frac{T_1}{T_3} \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

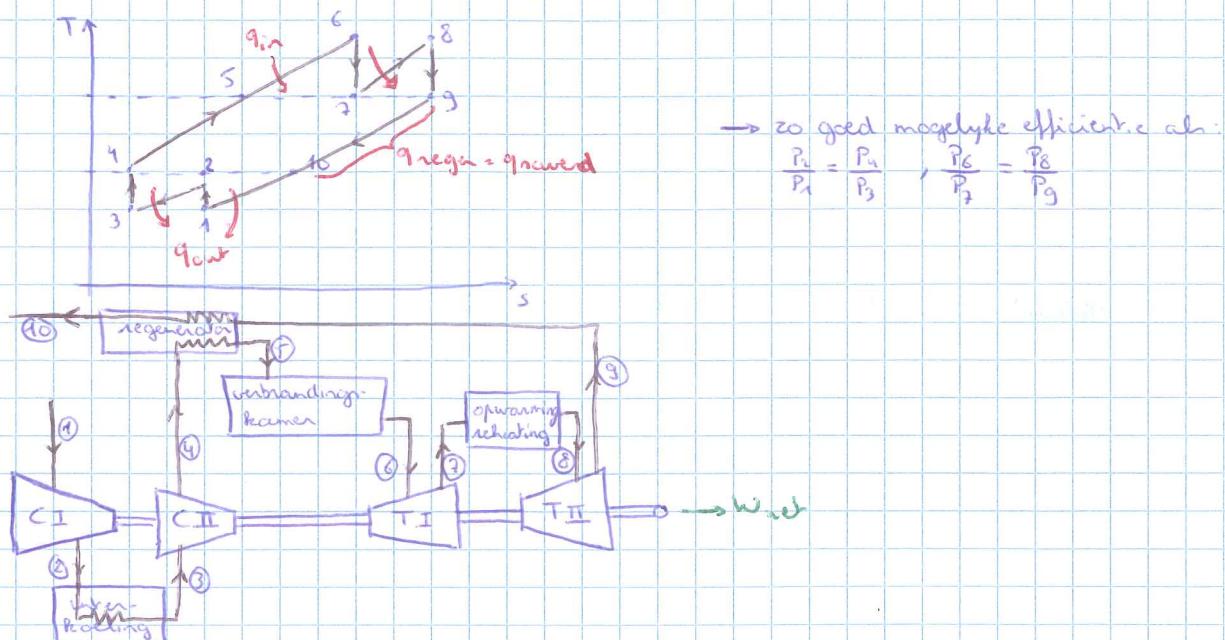


## Brayton cyclus met interkoeling, opwarming & regeneratie

→ multi-stage compressie dmv interkoeling  $\Rightarrow$  verlager arbeid nodig om gas samen te drukken

→ multi-stage expansie dmv reheating (opwarming)  $\Rightarrow$  werk output verhogen  
zonder max temperatuur te verhogen  
(benaderen als isothermisch proces)

$\hookrightarrow$  steady flow expansie/compressie arbeid is proportioneel met specifiek volume( $V$ ) v/e fluidum ~~proces~~. Daarom wordt gekozen om het specifieke volume zo laag mogelijk te houden tydens compressie & zo hoog mogelijk tydens expansie



## Ideale jet-aandrijfingscyclus

Gassen worden niet geëxpandiert tot omringende druk i/d turbine, maar tot een zodanige druk dat het geproduceerde vermogen door de turbine net voldoende is om de compressor & kulpmaterialen aan te drijven ( $W_{net,out} = 0$ )

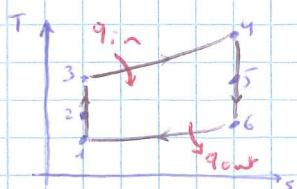
Gassen die door turbine worden uitgestoten worden versnelld door ~~een~~ relatief

hoge druk i/d nozzle om volledige stuwkracht te voorzien

(vliegweg aangegeven door versnelling fluidum in tegengetelde richting v/d beweging)

$$\hookrightarrow F = (mV)_{exit} - (mV)_{inlet} \Rightarrow Imp = F V_{vliegweg}$$

$$\text{efficiëntie v/d voortstuwing } \eta_p = \frac{\text{voortstuwend vermogen}}{\text{metheid energie input}} = \frac{Imp}{Q_{in}}$$



\* P<sub>T</sub> ~~proces~~ wanneer het verlaagt i/d diffuser

↳ lucht samengeperst i/d compressor

↳ menging met brandstof i/d verbrandingskamer (verbrandingsmed.)

↳ hoge P & T-gasen gedurende geëxpandiert i/d turbine  
om voldoende vermogen te genereren om compressor e.a.  
aan te drijven

↳ gassen geëxpandiert tot omringende druk  
i/d nozzle & relatieve motor ale hoge snelheid

→ modificaties:  
- kubofan = ventilator stuurt grote hoeveelheid lucht langs buizen rond de motor, ventilator uitlaat hogere snelheid  
 $\hookrightarrow$  verbeteren voortstuwing

- afterburner = tussen turbine & nozzle, extra brandstof toevoegen bij nood aan voortstuwing

- ramjet = geen compressor/turbine, hoge snelheidsvaartstuwing

- scramjet = ramjet bij supersonische snelheden

- rocket = vaste / vloeistof brandstof reageren met oxidator i/d verbrandingskamer

Energie (= beschikbare energie)  $\Rightarrow$  eigenschap: waarde verandert enkel als toestand wijkt

$\rightarrow$  (nuttige) arbeid potentiaal v/c systeem: tijdens reversibele proces v/c gespecificeerde begin/toestand tot omgevingstoestand (thermodynamisch evenwicht met omgeving = dode toestand) levert systeem de maximaal mogelijke arbeid

- \* directe omgeving is het gedelte dat wordt beïnvloed gedurende proces
- \* mechanische energie kan omgezet worden tot arbeid (volledig)

$$\begin{aligned} - X_{ke} &= p_e = \frac{v_e}{z} \\ - X_{pe} &= p_e = g z \end{aligned}$$

\* Omgaungsarbeid (arbeid door of tegen de omgeving gedurende proces) =  $W_{sum} = P_0(V_2 - V_1)$

\* Nuttige arbeid:  $W_n = W - W_{sum}$

$\hookrightarrow$  reversibele arbeid  $W_{rev} =$  maximale hoeveelheid (nuttige) arbeid ~~die~~ geproduceerd / minimale arbeid geleerd wanneer systeem en proces ondergaat van begin-naar eindtoestand

\* Irreversibiliteit  $I = W_{rev,out} - W_{rev,in} / I = W_{rev,in} - W_{rev,out}$

$\hookrightarrow$  efficiëntie v/c toestel maximaliseren door irreversibiliteit ervan te verlagen

### Efficiëntie v/d 2<sup>e</sup> wet RT

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,new}} = \frac{W_n}{W_{new}} = \frac{\text{herstelde energie}}{\text{verbruikte energie}} = 1 - \frac{\text{vernietige energie}}{\text{gebruikte energie}}$$

### Verandering van energie v/c systeem (thermo-mechanisch)

Vaste massa: ~~gesloten~~ gesloten systeem (nonflow)

$$\begin{aligned} \phi &= (u - u_0) + P(V - V_0) - T_0(S - S_0) + \frac{v^2}{2} + gz \\ &= (e - e_0) + P(V - V_0) - T_0(S - S_0) \end{aligned}$$

$\Rightarrow$  energieverandering =  $\Delta\phi = \Delta u + P\Delta V - T_0\Delta S + \frac{1}{2}\Delta v^2 + g\Delta z$

$\hookrightarrow \Delta u \geq 0$

[Flow/Stream]

$$\begin{aligned} \Psi &= (h - h_0) - T_0(S - S_0) + \frac{v^2}{2} + gz \quad (X_{flowing fluid} = X_{nonflowing fluid} + X_{flow}) \\ &= (u - u_0) + P(V - V_0) - T_0(S - S_0) + \frac{v^2}{2} + gz + (P_0 - P)V \\ &\Rightarrow \text{energieverandering } \Delta\Psi \end{aligned}$$

### Energie Transfer

① Warmte:  $X = \frac{1-T_0}{T} Q$

$\hookrightarrow$  ongeorganiseerde energie  $\Rightarrow$  slechts een deel kan worden omgezet tot arbeid

② Arbeid:  $X_{work} = \begin{cases} W - W_{sum} & (\text{omgaungsarbeid}) \\ W & (\text{andere vorm v/c arbeid}) \end{cases}$

③ Massa (proporioneel met energie, exergie & entropie)

$$X_{mass} = m\Psi$$

## Daling van energie-principe

Energie uit gesloten systeem daalt gedurende proces (constant indien reversibel)

$\Rightarrow$  energie vernietiging = entropie gegenereerd (door irreversibiliteiten)

$$X_{\text{destroyed}} = T_0 \Delta S_{\text{gen}} \geq 0$$

$$\begin{cases} >0 & \text{irreversibel proces} \\ =0 & \text{reversibel} \\ <0 & \text{onmogelijk} \end{cases}$$

## Exergiebalans $\Delta X_{\text{system}}$

$$\Delta X_{\text{system}} = X_{\text{in}} - X_{\text{out}} - X_{\text{destroyed}}$$