

## H6: thermische machines en de tweede wet van de thermodynamica

## 6.1 omzetting van arbeid in warmte en omgekeerd

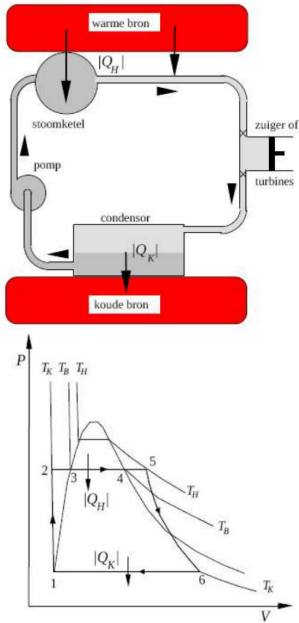
arbeid -> warmte	wrijving, vb twee stenen wrijven over elkaar -> arbeid wordt omgezet in warmte: $W=Q$
warmte -> arbeid	via een cyclus van processen zonder dat de toestand van het systeem wijzigt na elke cyclus > deze processen noemen een <i>cyclus</i> of <i>kringproces</i> > zetten warmte om in arbeid  er zijn twee types arbeidsmachines: 1: thermische arbeidsmachines 2: warmtepompen
> thermische arbeidsmachines	warmtebron geeft warmte aan werkzame stof, beschouwd als thermodyn. systeem > deze stof geeft dan warmte af aan een koude bron > voor een hele cyclus: <ul style="list-style-type: none"> <li>• de totale hoeveelheid warmte die door het systeem wordt opgenomen uit de warme bron, te noteren als <math> Q_H </math>,</li> <li>• de totale hoeveelheid warmte die door het systeem wordt afgegeven aan de koude bron, te noteren als <math> Q_K </math>,</li> <li>• de totale hoeveelheid arbeid verricht door het systeem, te noteren als <math> W </math>.</li> </ul> waarbij: $Q_H > 0$ , $Q_K < 0$ en $W < 0$  vb: stoommachine / motor
> warmtepompen	door toevoeging van arbeid via een werkzame stof ervoor zorgen dat er warmte van een koude naar een warme bron loopt nl: normaal gezien loopt warmte van warm->koud, maar dit willen we tegenwerken > voor een volledig cyclus: <ul style="list-style-type: none"> <li>• de totale hoeveelheid warmte die door het systeem wordt opgenomen uit de koude bron, te noteren als <math> Q_K </math>,</li> <li>• de totale hoeveelheid warmte die door het systeem wordt afgegeven aan de warme bron, te noteren als <math> Q_H </math>,</li> <li>• de totale hoeveelheid arbeid verricht op het systeem, te noteren als <math>W</math>.</li> </ul> nu: $Q_H < 0$ , $Q_K > 0$ en $W > 0$  vb: koelmachine, warmtepomp

## 6.2 thermische arbeitsmachines

verband arbeid en warmte	<p>Na elke cyclus blijft de inwendige energie altijd constant          &gt; er geldt dus doorheen het proces:</p> $ Q_H  -  Q_K  =  W .$
thermisch rendement	<p>We definiëren het rendement van een systeem als:</p> $\eta = \frac{ W }{ Q_H } = \frac{ Q_H  -  Q_K }{ Q_H } = 1 - \frac{ Q_K }{ Q_H }.$ <p>&gt; rendement van 100% als <math>Q_k = 0</math>, ie geen uitstroom van warmte naar de omgeving</p>
types verbranding	<p>De omzetting warmte-arbeid kan op twee manieren gebeuren          &gt; bij beiden is de werkzame stof een mengsel van gassen opgesloten in een vat          &gt; deze is verbonden met een stang die rotatie induceert          &gt; om arbeid te leveren wordt deze stof verwarmt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- uitwendige verbranding: stoommachine / strilingmotor</li> <li>- inwendige verbranding: benzine- en dieselmotoren</li> </ul>

## 6.2.1 de stoommachine

### stoommachine



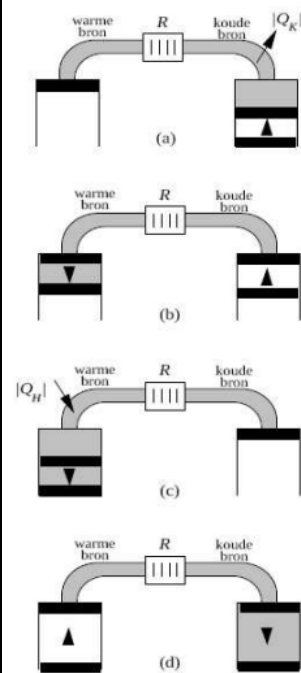
water bevindt zich in de condensor beneden kookpunt met een druk lager dan de atmosfeer  
 > water wordt gepompt naar de stoomketel  
 > verwarmt en omgezet tot stoom, bij ongeveer dezelfde druk  
 > bij benadering adiabatische expansie  
 > zuiger beweegt en drijft turbines aan  
 > temp en druk dalen tot deze van de condensor

rankinecyclus:  $1 \rightarrow 2$  adiabatische compressie van water tot de druk van de verwarmingsketel. In dit proces treedt slechts een kleine temperatuurverandering op,  
 $2 \rightarrow 3$  isobare verwarming van water tot het kookpunt,  
 $3 \rightarrow 4$  isobare en isotherme verdamping van water in verzadigde stoom op temperatuur  $T_B$  van de stoomketel,  
 $4 \rightarrow 5$  isobare oververhitting van stoom tot een temperatuur  $T_H$ ,  
 $5 \rightarrow 6$  adiabatische expansie van stoom in natte stoom,  
 $6 \rightarrow 1$  isobare en isotherme condensatie van stoom in verzadigd water bij temperatuur  $T_K$ .

er wordt warmte  $|Q_H|$  opgenomen uit de warme bron en warmte  $|Q_K|$  afgegeven aan de koude  
 > deze laatste stap is nodig om terug naar de begintoestand te gaan  
 > aangezien er warmte afgegeven wordt, zal nooit  $|Q_K|$  volledig omgezet worden in arbeid  
 > rendement kan nooit 100% zijn

## 6.2.2 de stirlingmotor

### stirlingmotor



twee zuigers verbonden met een krukas die zuigers in verschillende fase laat bewegen  
 > ruimte tss de zuigers gevuld met gas  
 > linker deel in contact met een warmtebron, rechter met een koude  
 > tss twee delen een regenerator R met lage thermische geleiding

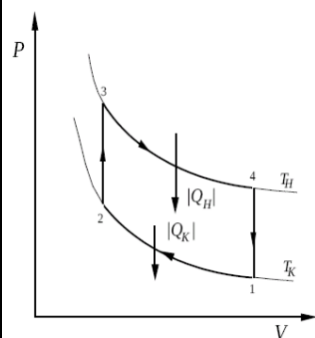
cyclus:  $1 \rightarrow 2$  Terwijl de linker zuiger boven blijft, beweegt de rechter zuiger half omhoog (figuur 6.3a), zodat het gas, in contact met de koude bron een hoeveelheid warmte  $|Q_K|$  afgeeft. Dit kan benaderd worden door een isotherme compressie bij een temperatuur  $T_K$ .  
 $2 \rightarrow 3$  De linker zuiger beweegt nu omlaag en de rechter zuiger volledig omhoog, op zo'n manier dat er geen volumeverandering optreedt (figuur 6.3b). Het gas wordt door de regenerator gedrukt en in contact met het warme reservoir gebracht. De regenerator voegt zo een hoeveelheid warmte  $|Q_R|$  toe aan het gas. Het proces zelf is isochoor.  
 $3 \rightarrow 4$  De rechter zuiger blijft stationair terwijl de linker zuiger verder naar beneden gaat (figuur 6.3c). Het gas, in contact met de warme bron, neemt een hoeveelheid warmte  $|Q_H|$  op. Dit is bij benadering een isotherme expansie bij een temperatuur  $T_H$ .  
 $4 \rightarrow 1$  Beide zuigers bewegen nu weer in tegengestelde richting op zo'n manier dat het volume constant blijft (figuur 6.3d). Het gas zal door de regenerator een hoeveelheid warmte verliezen die ongeveer even groot is als de hoeveelheid  $|Q_R|$  die tijdens het tweede proces werd opgenomen.

netto resultaat is een absorptie van warmte  $|Q_H|$  bij het isotherm proces op hoge temp  $T_H$  en uitstoot van warmte bij het isotherm proces op lage temp  $T_K$

er wordt gesteund op de veronderstellingen:

- het gas is ideaal
- er zijn geen lekken
- warmte gaat niet verloren in de cilinderwand
- regenerator is perfecte isolator
- er is geen wrijving

> ookal is dit niet zo, er is een warmte-afgifte  $|Q_K|$  die zorgt voor een gesloten cyclus



### 6.2.3 de benzinemotor

benzinemotor

zit is een viertaktmotor met 6 processen:

1: *inlaat*: mengsel van brandstofstofdamp en lucht wordt in de cilinders aangezogen  
 > gebeurt door neerwaartse beweging van de zuiger  
 nl: inlaatklep open, uitlaatklep dicht

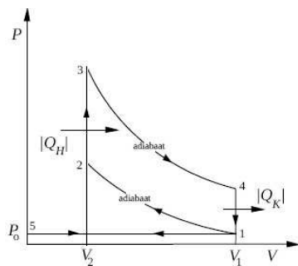
2: *compressie*: mengsel wordt door opwaartse beweging vd zuiger samengedrukt  
 > druk en temp stijgen heel hard  
 > beide kleppen dicht

3: *ontsteking*: mengsel wordt ontstoken door een elektrische vonk  
 > gebeurt heel snel, dus volume mag cte beschouwd worden

4: *expansie*: warme verbrandingsgassen duwen zuiger omlaag  
 > druk en temp dalen sterk

5: *eerste uitlaat*: op einde van expansie ontsnappen de verbrandingsgassen  
 > door hogere druk van het gas dan de atmosfeer  
 nl: uitlaatklep open

6: *tweede uitlaat*: opwaartse beweging vd zuiger duwt de resterende gassen buiten



Ottocyclus:  $5 \rightarrow 1$  stelt een quasistatische isobare inlaat voor, waarbij het volume van nul naar  $V_1$  en het aantal mol van nul naar  $n_1$  varieert, volgens de vergelijking

$$P_0 V = nRT_1, \quad (6.4)$$

waarbij  $P_0$  de atmosferische druk is en  $T_1$  de buitentemperatuur.

$1 \rightarrow 2$  stelt een quasistatische adiabatische compressie voor van  $n_1$  mol lucht. De temperatuur stijgt van  $T_1$  naar  $T_2$  volgens vergelijking

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}, \quad (6.5)$$

$2 \rightarrow 3$  stelt een quasistatische isochore toename voor van de temperatuur en druk van  $n_1$  mol gas, die met een reeks opeenvolgende warmereservoirs tussen  $T_2$  en  $T_3$  in contact komt, dit om toe te laten het proces als quasistatisch te beschouwen. Dit proces moet benaderend de explosie voorstellen. Daarbij wordt een hoeveelheid warmte  $|Q_H|$  opgenomen.

$3 \rightarrow 4$  stelt een quasistatische adiabatische expansie voor van  $n_1$  mol gas, waarbij de temperatuur varieert van  $T_3$  naar  $T_4$  volgens vergelijking

$$T_3 V_2^{\gamma-1} = T_4 V_1^{\gamma-1}. \quad (6.6)$$

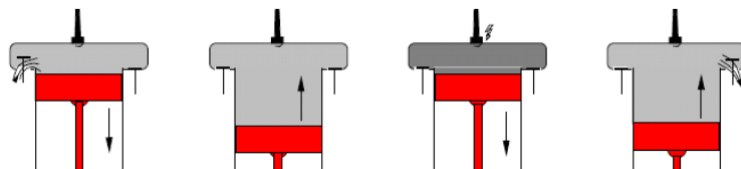
$4 \rightarrow 1$  stelt een quasistatische isochore temperatuur- en drukval voor van  $n_1$  mol gas, waarbij een hoeveelheid warmte  $|Q_K|$  uitgestoten wordt, met de benadering dat de lucht successievelijk in contact staat met reservoirs waarvan de temperatuur varieert van  $T_4$  naar  $T_1$  om het quasistatisch regime te verantwoorden. Dit proces moet benaderend de opening van de uitlaatklep voorstellen.

$1 \rightarrow 5$  stelt een quasistatisch isobare uitlaat bij atmosferische druk. Het volume daalt van  $V_1$  naar nul en het aantal mol van  $n_1$  naar nul, dit alles bij constante temperatuur  $T_1$  zodat de eerste vergelijking hier ook geldt.

Hierbij zijn enkele aannames gemaakt:

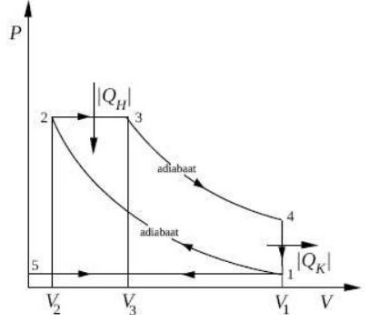
- het gas is ideaal
- alle processen gebeuren quasistatisch
- er treedt geen wrijving op

De isobaren  $5 \rightarrow 1$  en  $1 \rightarrow 5$  heffen elkaar op dus we hebben een cyclus



rendement benzinemotor	<p>veronderstel dat <math>C_V</math> cte is langs de lijn 2-&gt;3 en langs 4-&gt;1  &gt; we kunnen beide processen beschrijven volgens:</p> $Q_H = C_V(T_3 - T_2) =  Q_H  \text{ en } Q_K = C_V(T_1 - T_4) = - Q_K ,$ <p>waaruit:</p> $\eta = 1 - \frac{ Q_K }{ Q_H } = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}.$ <p>de twee adiabatische processen 3-&gt;4 en 1-&gt;2 voldoen aan:</p> $T_4 V_1^{\gamma-1} = T_3 V_2^{\gamma-1} \text{ en } T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1},$ <p>dus tezamen:</p> $(T_4 - T_1) V_1^{\gamma-1} = (T_3 - T_2) V_2^{\gamma-1},$ <p>dus vinden we:</p> $\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}.$ <p>noem <math>r = V_1/V_2</math> en we vinden:</p> $\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}.$
------------------------	--

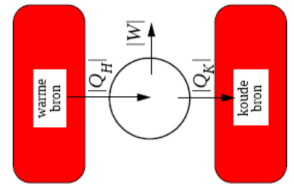
## 6.2.4 de dieselmotor

dieselmotor	<p>1: lucht ingenomen  2: comprimatie  3: dieselolie wordt in de motor gestoven  4...: analoog aan benzinemotor  &gt; verbranding is nagenoeg isobaar</p> <p>Hierbij zijn er neveneffecten: chemische reactie, wrijving, acceleratie, warmteverliezen  &gt; verwaarloos deze en beschouw een ideaal gas  &gt; dit is de <i>lucht-gestandaardiseerde dieselcyclus</i>  &gt; zelfde als bij benzine, behalve: 2-&gt;3 is horizontaal ipv verticaal</p> 
rendement dieselmotor	<p>vermits 2-&gt;3 isobaar zal: <math>Q_H = C_P(T_3 - T_2) =  Q_H </math>,  het rendement kan dan geschreven worden als</p> $\eta = 1 - \frac{ Q_K }{ Q_H } = 1 - \frac{C_V(T_4 - T_1)}{C_P(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}.$ <p>bij adiabatische processen geldt <math>TV^{\gamma-1} = \text{cte}</math> dus:</p> $T_4 V_1^{\gamma-1} = T_3 V_3^{\gamma-1} \text{ en } T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1},$ <p>waaruit we afleiden dat:</p> $(T_4 - T_1) V_1^{\gamma-1} = T_3 V_3^{\gamma-1} - T_2 V_2^{\gamma-1},$ <p>dus we hebben:</p> $T_4 - T_1 = \frac{T_3 V_3^{\gamma-1} - T_2 V_2^{\gamma-1}}{V_1^{\gamma-1}}.$ <p>daarnaast hebben we de voorwaarde voor een isobaar:</p> $T_2 = T_3 \frac{V_2}{V_3},$ <p>of dus het rendement is dan:</p> $\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{\frac{V_3^{\gamma-1}}{V_1^{\gamma-1}} - \frac{V_2^{\gamma}}{V_3 V_1^{\gamma-1}}}{1 - \frac{V_2}{V_3}} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{\left(\frac{V_3}{V_1}\right)^{\gamma} - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma}}{\frac{V_3}{V_1} - \frac{V_2}{V_1}}.$ <p>definieer de expansieverhouding en compressieverhouding:</p> $r_E = \frac{V_1}{V_3}, \quad r_C = \frac{V_1}{V_2},$ <p>dan is het rendement:</p> $\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{(1/r_E)^{\gamma} - (1/r_C)^{\gamma}}{(1/r_E) - (1/r_C)}.$

### 6.3 de formulering van Kelvin-Planck van de tweede wet van de thermodynamica

eigenschappen van warmtecycli

- 1: er is een proces of reeks processen waarbij een absorptie plaatsvindt van warmte uit een reservoir op hoge temperatuur, de warme bron
- 2: er is een proces of reeks processen waarbij een afgifte plaatsvindt van warmte naar een reservoir op lage temperatuur, de koude bron
- 3: er is een proces of reeks processen waarbij er arbeid aan de omgeving wordt geleverd



2e wet vd thermodynamica

Er is geen enkel proces mogelijk, dat de absorptie van warmte uit een warme bron en de omzetting van die warmte in arbeid als enig resultaat heeft

>> deze wet geeft ons op welke manier diverse energievormen kunnen worden omgezet  
nl: ontnemt de mogelijkheid om energie in een bepaalde richting te gebruiken

### 6.4 warmtepompen

warmtepomp

= onttrekken warmte aan een reservoir op lage temp en voeren dit toe aan een reservoir met een hoge temp door middel van een werkzame stof  
> steunt op het doorlopen van een cyclus van een werkmachine, maar in omgekeerde richting

werking warmtepomp

- er wordt een hoeveelheid warmte  $|Q_K|$  onttrokken uit de koude bron
- > er wordt een hoeveelheid warmte  $|Q_H|$  afgegeven aan de warme bron
- > hiervoor wordt een arbeid  $|W|$  geleverd
- > de inwendige energie van de werkzame stof blijft onveranderd, dus de 1e wet geldt:

$$|Q_H| - |Q_K| = |W|$$

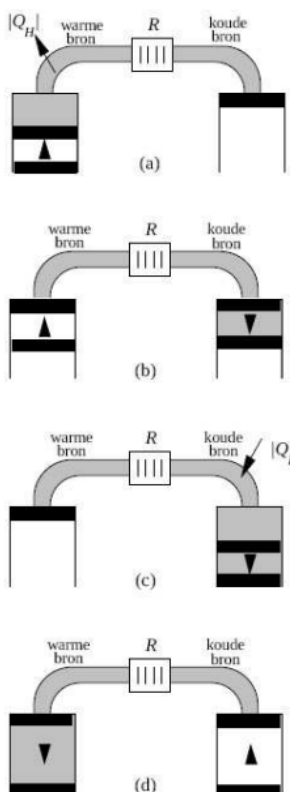
definieer de *prestatiecoëfficiënt* als:

$$\omega = \frac{|Q_K|}{|W|} \text{ of } \omega = \frac{|Q_K|}{|Q_H| - |Q_K|}, = \frac{|Q_H|}{|W|} - 1$$

#### 6.4.1 de Stirlingwarmtepomp

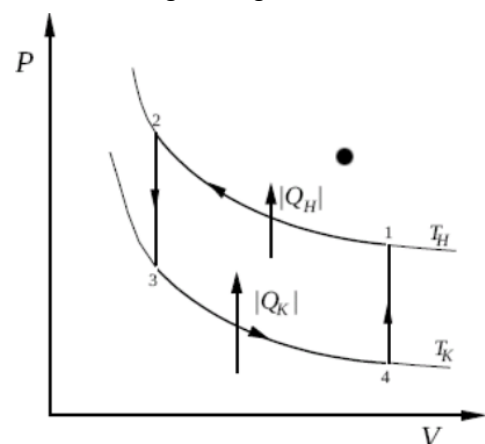
stirlingwarmtepomp

De pomp werkt volgens de cyclus:



- 1→2 Terwijl de rechter zuiger boven blijft, beweegt de linker zuiger half omhoog (figuur 6.9a), waardoor het gas, in contact met de warme bron warmte  $|Q_H|$  afgeeft. Dit kan benaderd worden door een isotherme compressie bij een temperatuur  $T_H$ .
- 2→3 De linker zuiger beweegt nu verder naar omhoog en de rechter zuiger naar omlaag, op zo een manier dat er geen volumeverandering optreedt (figuur 6.9b). Het gas wordt door de regenerator gedrukt en in contact met het koude reservoir gebracht. Het gas heeft nu een hoeveelheid warmte  $|Q_R|$  toegevoegd aan de regenerator. Het proces zelf is dus isochoor.
- 3→4 De linker zuiger blijft stationair terwijl de rechter zuiger verder naar beneden gaat (figuur 6.9c), zodat het gas in contact met de koude bron warmte  $|Q_K|$  opneemt. Dit is bij benadering een isotherme expansie bij een temperatuur  $T_K$ .
- 4→1 Beide zuigers bewegen nu weer in tegengestelde richting zodanig dat het volume constant blijft (figuur 6.9d). Het gas zal van de regenerator een hoeveelheid warmte opnemen die ongeveer even groot is als het bedrag  $|Q_R|$  dat in het tweede proces werd afgestaan.

>> deze cyclus is dezelfde als bij de Stirlingmotor maar in tegengestelde richting



## 6.4.2 warmtepompen als koelmachines

### Joule-Kelvin-smoorproces

gas/vloeistof word onder hoge druk door een thermische geïsoleerde poreuze wand of vernauwing, de *smoorklep*, geperst waarbij een drukverval ontstaat

- > bij gesatureerde vloeistoffen brengt dit een afkoeling en partiële verdamping teweeg
- > in de verdamper wordt de vloeistof volledig verdampt waarbij de nodige warmte onttrokken wordt aan de koude bron
- > de damp wordt vervolgens adiabatisch samengedrukt, waardoor temp verhoogt
- > in de condensator is alles weer vloeibaar en wordt condensatiewarmte afgestaan aan de warme bron

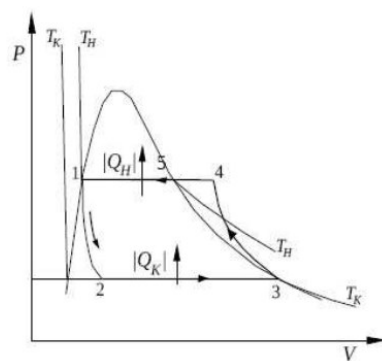
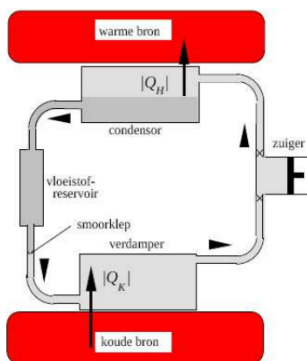
als we turbulentie, wrijving, warmteverliezen verwaarlozen hebben we:

1→2 Smoorproces met een druk- en temperatuurval. Bij een smoorproces kunnen de toestanden tussen begin- en eindtoestand niet beschreven worden met thermodynamische coördinaten over het gehele systeem. Dit is in het  $PV$ -diagram (figuur 6.12) dan ook aangeduid met een stippellijn.

2→3 Isotherme en isobare verdamping waarbij een hoeveelheid warmte  $|Q_K|$  geabsorbeerd wordt bij een temperatuur  $T_K$ .

3→4 Adiabatische compressie van de damp tot een temperatuur hoger dan die van de condensor  $T_H$ .

4→5 Isobare afkoeling.



## 6.5 de formulering van Clausius voor de 2e wet van de thermodynamica

### 2e wet volgens Clausius

Geen enkel proces is mogelijk, dat als enig resultaat heeft warmte van een kouder naar een warmer lichaam over te dragen

## 6.6 gelijkwaardigheid van de Kelvin-Planck en de Clausiusformulering van de tweede wet

### gelijkwaardigheid van beide formuleringen

We moeten aantonen dat als Kelvin-Planck niet geldt, ook Clausius niet en omgekeerd

1: K niet juist => C niet juist

beschouw een dubbel systeem: een arbeidsmachine en warmtepomp beide werkend tss dezelfde koude en warme bron

Veronderstel dat deze *niet* voldoet aan de K-Pformulering omdat ze geen warmte afstaat aan de koude bron

- > er wordt alleen een hoeveelheid warmte  $|Q_1|$  onttrokken aan de warme bron en een arbeid  $|W|$  geleverd op de omgeving

- > de 1e wet stelt:  $|Q_1| = |W|$ .

De arbeid van deze machine wordt nu gebruikt voor de warmtepomp

- > deze onttrekt een hoeveelheid warmte  $|Q_2|$  en een hoeveelheid warmte afstaat aan de warme bron

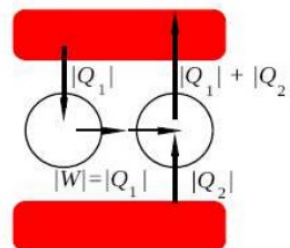
- > volgens de 1e wet:

$$|Q'_H| = |Q_2| + |W| = |Q_1| + |Q_2|.$$

bekijken nu het netto resultaat vd samengestelde machine

- > er is een hoeveelheid warmte  $|Q_2|$  onttrokken aan de koude bron en zonder uitwendige arbeid dezelfde hoeveelheid warmte afgegeven aan de warme bron

- >> is in strijd met de Clausiusformulering



gelijkwaardigheid van beide formuleringen

2: C niet geldig => K niet geldig

beschouw een samengesteld systeem bestaande uit een warmtepomp en arbeidsmachine  
> beide werkend tss dezelfde koude en warme bron

Veronderstel dat de warmtepomp zonder arbeid te leveren een warmte  $|Q_2|$  van de koude bron naar de warme bron overdraagt

ie: in tegenstrijd met Clausius

> vermits er geen arbeid is zal de afgestane warmte eveneens  $|Q_2|$  zijn

veronderstel nu dat de arbeidsmachine een hoeveelheid warmte  $|Q_1|$  onttrekt aan de warme bron

> levert arbeid zodat ze een hoeveelheid warmte  $|Q_2|$  afstaat aan de koude bron

> de 1e wet zegt:  $|W| = |Q_1| - |Q_2|$ .

netto is nu een hoeveelheid warmte  $|Q_1| - |Q_2|$  onttrokken aan de warme bron en volledig omgezet in arbeid

> dit is in strijd met de Kelvin-Planckformulering

