



WARMTE- EN STROMINGSLEER I & II BOUWFYSICA

J. De Ruyck, C. Lacor, G. Baron
Faculteit Toegepaste Wetenschappen
Vrije Universiteit Brussel

Cursusmateriaal (dienst uitgaven)



- ◆ Bouwkunde, Architectuur, Bio-ingenieurs : 1 boek
 - Çengel & Turner, Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences
- ◆ Werktuigkunde, Scheikunde (TW) : 3 boeken
 - Çengel & Boles, Thermodynamics – an engineering approach
 - White, Fluid Mechanics
 - Çengel & Turner, *Heat Transfer : a practical approach*
- ◆ Slides worden beschikbaar

Nomenklatuur



- ◆ (niet helemaal) Eenvormig over de modules warmte- en stromingsleer
- ◆ Voor thermo en warmte : overeenkomstig boeken van Çengel, angelsaksische literatuur
- ◆ NIET overeenkomstig EG voorstel civiele technieken

Nomenklatuur



- ◆ Een accent ' of een dot betekent per tijdseenheid (W' , Q' , m')
- ◆ Grote symbolen : extensief (E is energie in Joules)
- ◆ Kleine symbolen : intensief of 'specifiek' (e is specifieke energie in J/kg)

Nomenklatuur



Een hoeveelheid materie wordt uitgedrukt in :

- ◆ Massa (kg) (meestal)
- ◆ Aantal mol (kmol of kgmol)
- ◆ $M = \text{Massa/Aantal mol (kg/kmol)}$
- ◆ $1 \text{ kmol} = 1000 \text{ (g)mol}$

WARMTE- EN STROMINGSLEER BOUWFYSICA

THERMODYNAMICA 1 – 12u HOC

J. De Ruyck
Vakgroep Werktuigkunde
Vrije Universiteit Brussel



Doel van deze module



- ◆ Praktische basis thermodynamica
- ◆ Minimale voorkennis
- ◆ Minimum theoretische achtergrond
- ◆ Meer fundamenten in module 2

Inhoud van deze module :



Behoudswetten (week 1) :

- ◆ Opmaken van energiebalans
- ◆ Balans van mechanische energie
- ◆ Entropie

Inhoud van deze module (vervolg):



Werkstoffen (week 1-2) :

- ◆ Invoeren van de temperatuur
- ◆ Perfecte gassen (lucht)
- ◆ Onsamendrukbare stoffen (vl. water)
- ◆ Reële stoffen (NH₃, CO₂, R12, ..)

Inhoud van deze module (vervolg) :



Toepassing op componenten (wk 2-3) :

- ◆ Pompen
- ◆ Ventilatoren
- ◆ Compressoren
- ◆ Expansiekranen
- ◆ Warmtewisselaars

Inhoud van deze module (vervolg) :



Toepassing op kringprocessen (week 3):

- ◆ Vermogen- en koudeproductie
- ◆ Kringproces van Carnot
- ◆ Toepassingen

Inleidende begrippen (C&T 1.2/ C&B 1)



'Klassieke thermodynamica' :

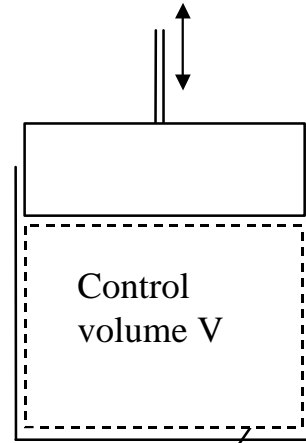
- ◆ Milieu = continuum (geen diep vacuum)
- ◆ Enkel macroscopische fenomenen

Inleidende begrippen (C&T 1,2/ C&B 1)



'Gesloten systeem' :

Niet stationnair

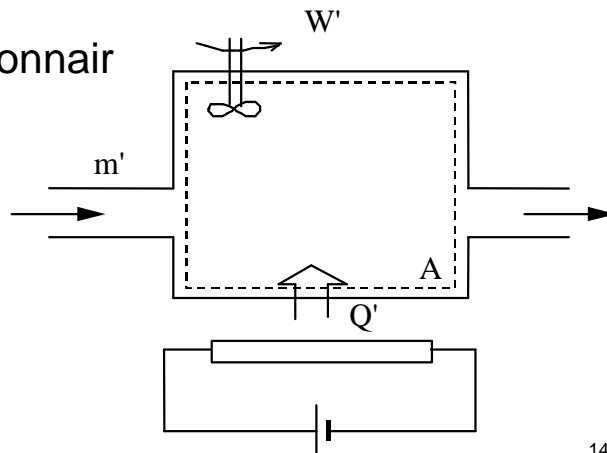


Inleidende begrippen (C&T 1,2/ C&B 1)



'Open systeem' :

Meestal stationnair



Inleidende begrippen (C&T 1,2/ C&B 1)



Lokale (intensieve eigenschappen) :

- ◆ Druk, drukkracht $\vec{F} = -\int_A p d\vec{A}$
- ◆ Densiteit $r = \frac{dm}{dV} = \frac{1}{v}$

Inleidende begrippen (C&T 1,2/ C&B 1)



Lokale (intensieve eigenschappen) :

- ◆ Temperatuur : maat voor de moleculaire agitatie

mol. kinetische energie =
 $\frac{1}{2}kT$ *per vrijheidsgraad*
(enkel ideale gassen)

Inleidende begrippen (C&T 1,2/ C&B 1)



Coherente eenheden :

- ◆ IS, SI of MKS : 'International System'
 - Meter m
 - Kilogram massa kg(m)
 - Seconde s
 - Kelvin K
- ◆ USCS : 'US Customary System'
 - Foot ft
 - Pond massa lbm
 - Seconde s
 - Rankine R

Inleidende begrippen (C&T 1,2/ C&B 1)



NIET coherente enheden :

- ◆ **1 Calorie = 4.182 Joule**
- ◆ **$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.(15)^{\circ}$**
- ◆ **1 atm = 1.013 bar = 1.013 10^5 Pa (~ 1 bar)**
- ◆ **1 BTU = 1.05 kJ**
- ◆ 1 inch = 1/12 ft
- ◆ 14,5 PSI = 1 bar
- ◆ **$T(^{\circ}\text{F}) = T(\text{R}) - 459.67^{\circ}$ (460)**

Inleidende begrippen (C&T 1,2/ C&B 1)



Belangrijkste omzettingen SI - USCS :

- ◆ 10 ft ~ 3 m
- ◆ 1K = 1.8R
- ◆ 14.5 PSI ~ 1 bar
- ◆ 1 BTU = 1.05 kJ ~ 1 kJ
- ◆ 1 lbm ~ 0.45 kg

Behoud van massa :



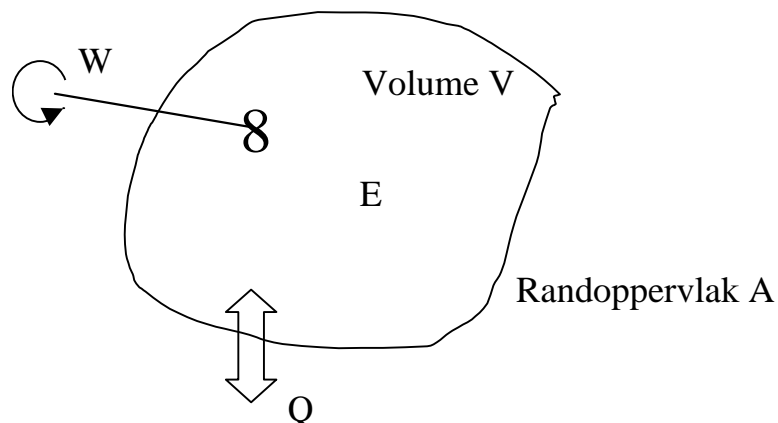
- ◆ Bij een stationnair proces blijven massadebiten (kg/s) konstant
- ◆ Volumedebieten (m³/s) zijn over het algemeen NIET konstant
- ◆ Om toch met volumedebieten te kunnen werken kiest men een vaste dichtheid

Behoud van volumedebiet : de 'normaal' kubieke meter



- ◆ Bij een vaste temperatuur en druk is een volumedebiet wel konstant
- ◆ Referentie temperatuur en druk zijn 0°C of 273K en 1 atm of 101300 Pa
- ◆ Gaswet ($p=\rho RT$), droge lucht ($R=287\text{ J/kgK}$) $\rightarrow \rho = 1.29\text{ kg/Nm}^3$
- ◆ 1 kg komt overeen met 0.77 Nm^3

Energiebalans van een gesloten systeem (C&T 5-1.5-2/ C&B 4-1.4-2)



Wat is 'energie' E NIET ?



'Vermogen om arbeid te leveren' :

- ◆ Populaire definitie
- ◆ Wordt 'verbruikt' ok kan 'verloren gaan'
- ◆ Wordt in de wetenschap 'exergie' genoemd (module 2)

Wat is 'energie' E wel ? (C&T 5-1.5-2/C&B 4-1.4-2)



E is de som van

- ◆ Kinetische energie
- ◆ Potentiële energie
- ◆ Interne energie
- ◆ Andere .. (vb polarisatie, magnetisatie)

Wat is 'interne energie' U ? (C&T 5-1,5-2/ C&B 4-1,4-2)



U is de som van

- ◆ 'Voelbare warmte' : thermische agitatie van moleculen
- ◆ 'Latente warmte' : aggregatietoestand
- ◆ 'Chemische warmte' : samenstelling

Kinetische en potentiële energie ?

(C&T 5 1,5 2/ C&B 1 1, 1 2)



$$E_{kin} = \frac{m\mathbf{u}^2}{2} \quad (\mathbf{u} \text{ homogeen})$$

$$E_{pot} = mgz \quad (z = \text{zwaartepunt})$$

Kinetische en potentiële energie ?

(C&T 5-1,5-2/ C&B 4-1,4-2)



$$E_{kin} = \int_V \frac{\mathbf{u}^2}{2} dm = \int_V \frac{\mathbf{u}^2}{2} \rho dV$$

$$E_{pot} = \int_V gz dm = \int_V \rho gz dV$$

Energiebalans gesloten systeem, eerste hoofdwet (C&T 5-1,5-2/ C&B 4-1,4-2)



- ◆ Om een gesloten systeem van een toestand E_1 te brengen tot een toestand E_2 is steeds dezelfde hoeveelheid energie nodig.

$$E_2 - E_1 = \mathbf{DE} = Q - W + \text{andere...}$$

Energiebalans gesloten systeem, eerste hoofdwet (C&T 5-1,5-2/ C&B 4-1,4-2)



- ◆ Delen door een tijdsinterval :

$$\frac{DE}{Dt} = Q' - W' + \text{andere...}$$

- ◆ E = 'Energie' (J)
- ◆ W' = Mechanisch vermogen (W)
- ◆ Q' = Thermisch vermogen, warmteflux (W)
- ◆ Andere.. (El.magnetische fluxen)

Energiebalans gesloten systeem, tekenconventie (C&T 5-1,5-2/ C&B 4-1,4-2)



$$\frac{DE}{Dt} = Q' - W'$$

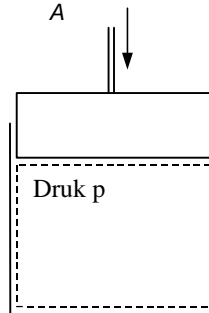
- ◆ W' = positief naar BUITEN
- ◆ Q' = positief naar BINNEN

Mechanisch vermogen W' (C&T 4-2,4-3/ C&B 3-3)



- ◆ Via drukverplaatsing :

$$W' = \vec{F} \cdot \vec{u} = - \int_A p \vec{u} \cdot d\vec{A} = p u A$$



Mechanisch vermogen W' (C&T 4-2,4-3/ C&B 3-3)



- ◆ Via schuifkrachten :

$$W' = \vec{F} \cdot \vec{u} = u t A$$

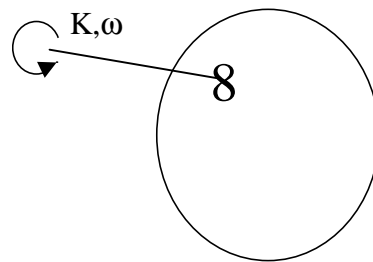


Mechanisch vermogen W' (C&T 4-2,4-3/ C&B 3-3)



- ◆ Via torsie (=schuifkrachten) :

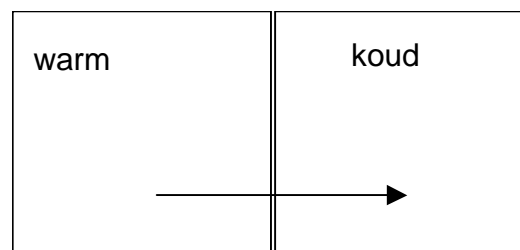
$$W' = K \cdot \omega$$



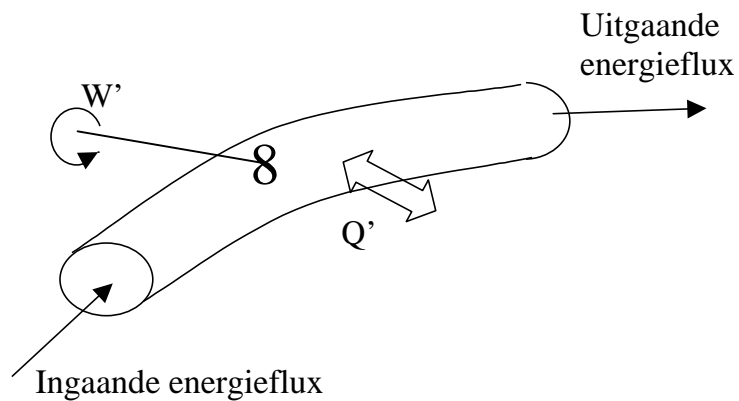
Warmteflux (C&T 4-1/ C&B 3-1)



Q' = impulsoverdracht op
moleculaire schaal



Energiebalans van een OPEN systeem (C&T 4-5,5-3/ C&B 3-6,4-3)



Energiebalans van een OPEN systeem (C&T 4-5/ C&B 3-6)



Ingaande energieflex (in Watt) bestaat uit twee delen :

- ◆ Flux van $E (= m' \cdot e)$, materiegebonden
- ◆ Mechanisch vermogen door verplaatsing van druk $(=A \cdot V \cdot p)$

Energiebalans van een OPEN systeem (C&T 4-5/ C&B 3-6)



Ingaande energieflex

$$= m'e + pAV$$

$$= m'(e + p/r)$$

$$= m'(u + p/r + e_{kin} + e_{pot})$$

$$= m'(h + e_{kin} + e_{pot})$$

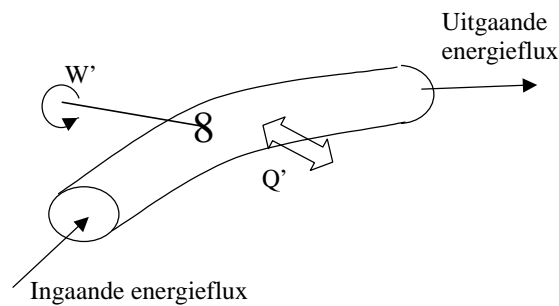
definitie van ENTHALPIE (C&T 4-5/ C&B 3-6)



Specifieke enthalpie :

$$h = u + p/r \quad (\text{J/kg})$$

Globale energiebalans van een open systeem (C&T 5-3/ C&B 4-3)



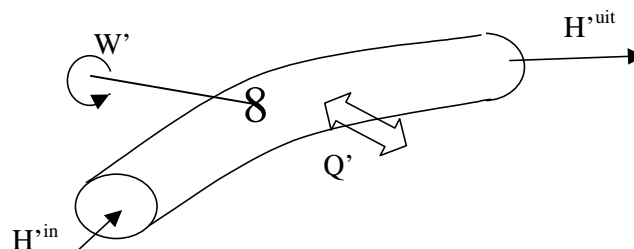
$$\frac{DE}{Dt} = Q' - W' + m' \left(h + \frac{u^2}{2} + gz \right)^{in} - m' \left(h + \frac{u^2}{2} + gz \right)^{uit}$$

Globale energiebalans van een open systeem : vereenvoudiging (C&T 5-3/ C&B 4-3)



- ◆ Stationnair systeem
- ◆ Kinetische en potentiële energie klein

$$Q' - W' \cong H'^{uit} - H'^{in} \quad ; \quad H' = m' h$$



Globale energiebalans van een open systeem : vereenvoudiging (C&T 5-3/ C&B 4-3)



$$Q' - W' \cong H^{uit} - H^{in}$$

◆ Delen door m' : J/kg ipv J/s

$$q - w \cong h^{uit} - h^{in}$$

Globale energiebalans van een open systeem : conclusies (C&T 5-3/ C&B 4-3)



- ◆ Energiebalans opgesteld
- ◆ De begrippen interne energie U en enthalpie H zijn nog niet kwantitatief bepaald

Balans van mechanische energie

(C&T 11-4/ C&B 6-10)



Mechanische energie kan intern in het systeem omgezet worden in :

- ◆ Druk
- ◆ Hoogte, potentiële energie
- ◆ Kinetische energie
- ◆ *Warmte via interne wrijving, dissipatie ('lost work')*

Balans van mechanische energie

(C&T 11-4/ C&B 6-10)



Dissipatie :

- ◆ Gevolg van schuifkrachten, wrijvingen
- ◆ Omzetting van mechanische energie naar warmte
- ◆ 'Energie' blijft behouden, maar wordt minder bruikbaar
- ◆ 'Interne' warmteproductie D' , niet te verwarren met 'externe' aanvoer van warmte Q'

Balans van mechanische energie

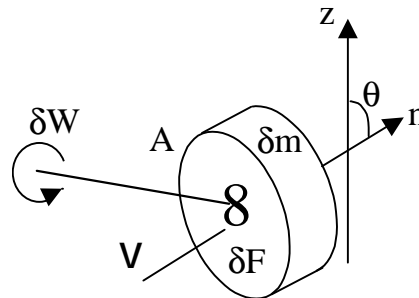
(C&T 11-4/ C&B 6-10)



Behoud van hoeveelheid beweging :

$$m \cdot \vec{a} = m \cdot \frac{d\vec{u}}{dt} = \sum \vec{F}$$

$$d m \cdot \frac{d\vec{u}}{dt} = \sum d\vec{F}$$



Thermo 1 NL/sept2003

45

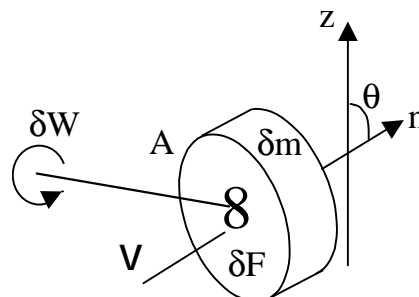
Balans van mechanische energie

(C&T 11-4/ C&B 6-10)



Scalair vermenigvuldigen met snelheid :

$$d m \vec{u} \cdot \frac{d\vec{u}}{dt} = \sum \vec{u} \cdot d\vec{F}$$



Thermo 1 NL/sept2003

46

Balans van mechanische energie

(C&T 11-4/ C&B 6-10)



Beperken tot stationnair systeem :

Materiële afgeleide

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \cancel{\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}} + \mathbf{u} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial n}$$

Balans van mechanische energie

(C&T 11-4/ C&B 6-10)



Beperken tot stationnair systeem :

$$\begin{aligned} dm \cdot \mathbf{u} \cdot \frac{d\mathbf{u}}{dt} &= r \cdot A \cdot d\mathbf{n} \cdot \left(\mathbf{u} \cdot \frac{d\mathbf{u}}{dn} \right) = r \cdot A \cdot \mathbf{u} \cdot d \frac{\mathbf{u}^2}{2} \\ &= m' \cdot d \frac{\mathbf{u}^2}{2} \end{aligned}$$

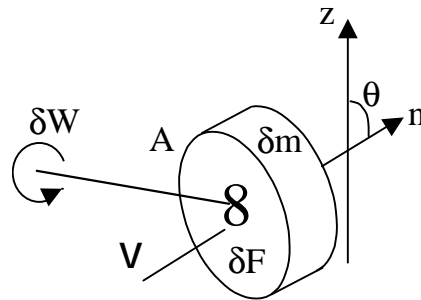
Balans van mechanische energie

(C&T 11-4/ C&B 6-10)



Bijdrage drukkrachten :

$$\vec{u} \cdot d\vec{F} = -\mathbf{u} \cdot A dp = -V' \cdot dp$$



Thermo 1 NL/sept2003

49

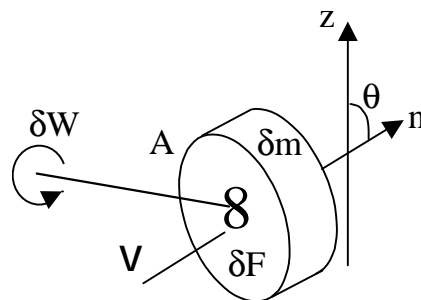
Balans van mechanische energie

(C&T 11-4/ C&B 6-10)



Bijdrage zwaartekracht :

$$\begin{aligned} \vec{u} \cdot d\vec{F} &= d m \cdot \vec{g} \cdot \vec{u} = r \cdot A u \cdot g \cdot dn \cdot \cos \theta \\ &= -m' \cdot g \cdot dz \end{aligned}$$



Thermo 1 NL/sept2003

50

Balans van mechanische energie

(C&T 11-4/ C&B 6-10)



Bijdrage externe krachten :

$$\vec{u} \cdot d\vec{F} = -dW'$$

Bijdrage wrijvingskrachten, dissipatie :

$$\vec{u} \cdot d\vec{F} = -dD < 0$$

Balans van mechanische energie

(C&T 11-4/ C&B 6-10)



Som van alle bijdragen :

$$-dW' = V' \cdot dp + dm' \left(\frac{u^2}{2} + gz \right) + dD'$$

Integreren tussen in- en uitlaat :

$$-W' = V' \cdot (p^{uit} - p^{in}) + m' \left(\frac{u^2}{2} + gz \right)^{uit} - m' \left(\frac{u^2}{2} + gz \right)^{in} + D'$$

Balans van mechanische energie

(C&T 11-4/ C&B 6-10)



$$-W' = V' \cdot (p^{uit} - p^{in}) + m' \cdot \left(\frac{u^2}{2} + gz \right)^{uit} - m' \cdot \left(\frac{u^2}{2} + gz \right)^{in} + D'$$

Beperkingen !!

- ◆ Stationnair
- ◆ Constante densiteit -> constant volumedebiet V'
- ◆ Geen andere krachten

Thermo 1 NL/sept2003

53

Balans van mechanische energie

(C&T 11-4/ C&B 6-10)



Indien geen constante densiteit :

$$V' \cdot (p^{uit} - p^{in}) \rightarrow \int_{in}^{uit} V' \cdot dp = m' \cdot \int_{in}^{uit} \frac{dp}{r}$$

Voorlopig enkel nodig bij
gascompressoren..later ook bij
gasdynamica

Thermo 1 NL/sept2003

54

Balans van mechanische energie

(C&T 11-4/ C&B 6-10)



Balans in J/kg, delen door m' ($\rho = \text{cte}$) :

$$-w = \left(\frac{p}{r} + \frac{u^2}{2} + gz \right)^{\text{uit}} - \left(\frac{p}{r} + \frac{u^2}{2} + gz \right)^{\text{in}} + d$$

Omzetting van mechanische energie

(C&T 11-4/ C&B 6-10)



Vereenvoudiging bij machines :

klein hoogteverschil

variatie kinetische energie klein

$$-w \cong \frac{p^{\text{uit}} - p^{\text{in}}}{r} + d$$

Omzetting van mechanische energie

(C&T 7-12, 11-1/ C&B 6-12, komt overeen met isentroop of adiabatisch rendement)



Bij pompen en ventilatoren : rendement invoeren

$$\begin{aligned} h &= \frac{-w - d}{-w} = 1 - \frac{d}{-w} \\ &= \frac{v(p_t^{uit} - p_t^{in})}{-w} = \frac{V'(p_t^{uit} - p_t^{in})}{-W'} \quad (w < 0) \end{aligned}$$

Omzetting van mechanische energie

(C&T 7-10, 11-1/ C&B 6-10)



Bij stroombuizen met $w=0$: vergelijking van Bernoulli, verlies van 'lading'

$$\left(\frac{p}{\rho} + \frac{\rho u^2}{2} + \rho g z \right)^{in} - \left(\frac{p}{\rho} + \frac{\rho u^2}{2} + \rho g z \right)^{uit} = d$$

Stand van zaken :



Twee basiswetten :

- ◆ Energiebalans :
 - Mechanische energie
 - Externe warmtefluxen
 - Enthalpie
- ◆ Balans van mechanische energie
 - Dissipatie of interne warmteproductie
 - Totale druk
 - Wet van Bernoulli
 - Beperkingen ! Constante densiteit, stationnair

Het begrip entropie



- ◆ In theorie zou men zonder entropie kunnen werken
- ◆ Entropie wordt nuttig bij 'samendrukbare' stromingen, tzt bij gascompressoren, later bij gasdynamica, chemie,..
- ◆ Invoeren door de twee basiswetten te combineren

Combinatie van basiswetten

(C&T 7-7,7-8/ C&B 6-7)



$$0 = -w + q + \left(h + \frac{u^2}{2} + gz \right)^{in} - \left(h + \frac{u^2}{2} + gz \right)^{uit}$$
$$+ \quad -w = \frac{p^{uit} - p^{in}}{r} + \left(\frac{u^2}{2} + gz \right)^{uit} - \left(\frac{u^2}{2} + gz \right)^{in} + d$$

$$h^{uit} - h^{in} - \frac{p^{uit} - p^{in}}{r} = q + d$$

Een extra, afgeleide energiewet

(C&T 7-7,7-8/ C&B 6-7)



$$h^{uit} - h^{in} - \frac{p^{uit} - p^{in}}{r} = q + d$$

In kleine stapjes, ρ hoeft niet constant te zijn :

$$dh - \frac{dp}{r} = dh - v dp = q + d$$

Invoeren van entropie s (C&T 7-7,7-8/ C&B 6-7)



$$dh - \frac{dp}{r} = dq + dd$$

$$dh - \frac{dp}{r} = Tds = dq + dd$$

$$ds = \frac{dq + dd}{T} \quad ; \quad \oint ds = 0$$

Het begrip entropie (C&T 7-2/ C&B 6-2)



$$ds = \frac{dq + dd}{T}$$

- ◆ Maat voor aanvoer van extern + interne warmte, in verhouding tot hun temperatuur

Het begrip entropie (C&T 7-2/ C&B 6-2)



$$ds = \frac{dq}{T} \geq 0$$

- ◆ Adiabatisch systeem ($q=0$) : entropie kan alleen maar toenemen want d is steeds positief of nul (tweede hoofdwet)

Het begrip entropie (C&T 7-2/ C&B 6-2)



$$ds = 0$$

- ◆ Adiabatisch en ideaal systeem ($q=d=0$) :
- ◆ De entropie blijft constant
- ◆ Het proces is 'isentrop'
- ◆ Nog steeds een energiebalans

Stand van zaken :



Twee basiswetten :

- ◆ Energiebalans
- ◆ Omzetting van mechanische energie

Extra wet door combinatie

- ◆ Begrip entropie
- ◆ Tweede hoofdwet