

# TSFS09 – Modelling och Reglering av Motorer och Drivlinor (MoDr)

Fö 3 – Arbetsprinciper, termodynamik och modeller för motormoment

Lars Eriksson - Kursansvarig

Fordonssystem, Institutionen för Systemteknik  
Linköpings universitet  
lazer@isy.liu.se

September 5, 2018

## Innehållsförteckning

Repetition  
Luft och bränsle  
Modellvalidering

Arbetsprinciper och Momentgenerering

Sammanfattning av termodynamiken

Motor cykelräkning

Motor, mer om arbetsprinciperna

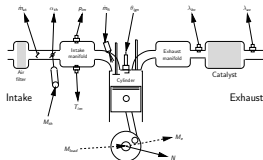
1 / 36

2 / 36

## Luft och bränsle → Arbete och emissioner

Medelvärdesmodellering

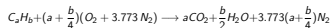
Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



3 / 36

## Förbränning och stökiometri

- ▶ Perfekt förbränning av ett kolväte



- ▶ Stökiometriskt luft/bränsle-förhållande

$$(A/F) = \frac{m_a}{m_f} \text{ och } (A/F)_s = \frac{(a + \frac{b}{4})(2 \cdot 16.00 + 3.773 \cdot 2 \cdot 14.007)}{12.01 a + 1.008 b}$$

- ▶ Normaliserat luft/bränsle-förhållande

$$\lambda = \frac{(A/F)}{(A/F)_s} = \frac{\frac{m_a}{m_f}}{(A/F)_s} \text{ och } \phi = \frac{1}{\lambda}$$

Frigjord värme och en enkel modell

$$Q = \min(\lambda, 1) \cdot m_f \cdot q_{LHV}$$

4 / 36

## Modellsammanfattning 1(3)

Gaspedalstolkning och trottelposition

$$\alpha_{ref} = u_{pedal} \quad \text{där } u_{pedal} \in [0, 1]$$

$$\alpha = H_{\alpha}(s) \alpha_{ref}$$

Luftflöde in i insugsröret

$$\dot{m}_{at}(\alpha, p_{amb}, T_{amb}, \Pi) = \frac{p_{amb}}{\sqrt{R T_{amb}}} \cdot A_{th}(\alpha) \cdot C_{th}(\alpha) \cdot \Psi(\Pi)$$

Luftflöde in i cylindern

$$\dot{m}_{ac}(N, p_{im}, T_{im}) = \eta_{vol}(N, p_{im}) \frac{p_{im} V_d n_{cyl} N}{R T_{im} n_i}$$

Tryckkuppbyggnad i insugsröret

$$\frac{dp_{im}}{dt} = \frac{R T_{im}}{V_{im}} \frac{dm_{im}}{dt} = \frac{R T_{im}}{V_{im}} (\dot{m}_{at} - \dot{m}_{ac})$$

5 / 35

## Modellsammanfattning 2(3)

Flöde genom katalysator och avgassystemet (inkompressibel turbulent)

$$\dot{m}_{cat} = C_3 \sqrt{\frac{p_{em} \Delta p}{R T_{em}}}$$

Gasflöde från motorn

$$\dot{m}_{cyl} = \dot{m}_{ac} + \dot{m}_{fc}$$

Tryckkuppbyggnad i avgasröret

$$\frac{dp_{em}}{dt} = \frac{R T_{em}}{V_{em}} \frac{dm_{em}}{dt} = \frac{R T_{em}}{V_{em}} (\dot{m}_{cyl} - \dot{m}_{cat})$$

Avgastemperatur ...

6 / 35

## Modellsammanfattning 3(3)

Bränsleinjektor - Port inspr.

$$\dot{m}_{fi} = C_1 N (t_{inj} - t_0(u_{batt}))$$

Bränslefilm

$$\frac{dm_{fp}}{dt} = X \dot{m}_{fi} - \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp}$$

$$\dot{m}_{fc} = (1 - X) \dot{m}_{fi} + \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp}$$

$\lambda$  till motor

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{ac}}{\dot{m}_{fc}} (A/F)_s$$

Gasblandning & Transportfördörjning

$$\frac{d}{dt} \lambda_{exh}(t) = \frac{1}{\tau_{mix}} (\lambda(t - \tau_d(N)) - \lambda_{exh}(t))$$

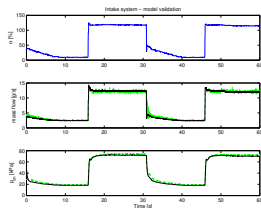
Sensordynamik

$$\frac{d}{dt} \lambda_s(t) = \frac{1}{\tau_{\lambda}} (\lambda_{exh}(t) - \lambda_s(t))$$

Bränsleinjektor - Direkt inspr.

$$\dot{m}_{fc} = C_1 N (t_{inj} - t_0(u_{batt}))$$

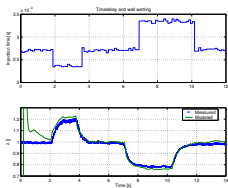
## Insugsrör – Modellvalidering



7 / 35

8 / 35

## (A/F) Bränslets väg – Modellvalidering



–Glöm inte bort att sätta initialvärden!

9 / 36

## Innehållsförteckning

Repetition

Arbetsprinciper och Momentgenerering

Arbetscykeln

Grundläggande begrepp

Termodynamik

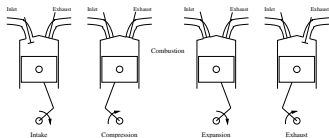
Sammanfattning av termodynamiken

Motor cykelräkning

Motor, mer om arbetsprinciperna

10 / 36

## Fyrtaktsprincipen

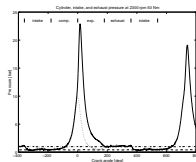


En cykel = 2 varv =  $4\pi$

11 / 36

## Indikatorordigram

Indikatorordigram – Cylindertryck som funktion av vevaxelvinkel  $\theta$



12 / 36

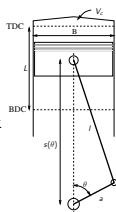
## Motorgeometri ⇒ Volym

Cylinder bore	$B$
Connecting rod length	$l$
Crank radius	$a$
Piston stroke	$L = 2a$
Crank angle	$\theta$
Clearance volume	$V_c$
Displaced volume	$V_d = \frac{\pi B^2 L}{4}$

$$r_c = \frac{\text{maximum cylinder volume}}{\text{minimum cylinder volume}} = \frac{V_d + V_c}{V_c}$$

$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi B^2}{4} (l + a - s(\theta))$$

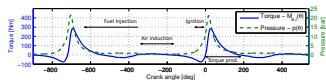
$$s(\theta) = a \cos \theta + \sqrt{l^2 - a^2 \sin^2 \theta}$$



13 / 36

## Cylindertryck och momentant moment

Tryck och moment från en cylinder, pulsationer ger varvtalsvariationer (Mätning i labbet och koppling till diagnos).

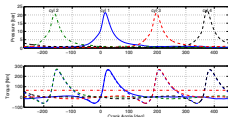


Fler cylindrar och svänghjulet smetar ut variationerna

14 / 36

## Cylindertryck och momentant moment

Flera cylindrar



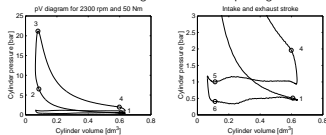
Medelvärdesmodellens och motorns moment:

$$M_e = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} M_{cyl}(\theta) d\theta - M_f = \frac{1}{4\pi} \oint p(V) dV - M_f$$

15 / 36

## Indikatordiagram

Samma indikatordiagram omräknat till pV-diagram



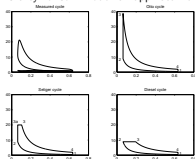
Varför pV-diagram?

–Arbetet kan räknas fram genom  $W = \oint p dV$

16 / 36

## Cykler

Termodynamiska cykler som modell av uppmätt indikatorgram



Viktigt att göra skillnad på:  
Ottomotor  $\neq$  Ottocykel

Dieselmotor  $\neq$  Dieselykel

17 / 36

## En kort sammanfattning av termodynamiken

Mass specifika storheter – små bokstäver

$$v = \frac{V}{m}, q = \frac{Q}{m}, u = \frac{U}{m}, h = \frac{H}{m}, w = \frac{W}{m}$$

Ideal gas

$$pV = mRT$$

$$pv = RT$$

1:a Huvudsatsen

$$dQ = dU + dW$$

$$dq = du + dw$$

Rev. arbete

$$dW = p dV$$

$$dw = p dv$$

Entalpi

$$H = U + pV$$

$$h = u + pv$$

1:a H. (igen)

$$dH = dU + dpV + p dV$$

$$dh = du + dpv + p dv$$

Värmekapacitet

$$dQ = dH - V dp$$

$$dq = dh - v dp$$

$c_v = \left(\frac{dQ}{dT}\right)_v$

$$c_v = \left(\frac{dq}{dT}\right)_v$$

$$c_p = \left(\frac{dQ}{dT}\right)_p$$

$$c_p = \left(\frac{dq}{dT}\right)_p$$

Samband:

$$du = c_v dT$$

$$dh = c_p dT$$

Ratio of specific heats

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

$$\gamma \in [1.2, 1.4]$$

18 / 36

## Innehållsförteckning

Repetition

Arbetsprinciper och Momentgenerering

Sammanfattning av termodynamiken

Termodynamiska system, processer, och cykler

Motor cykelräkning

Motor, mer om arbetsprinciperna

19 / 36

## En kort sammanfattning av termodynamiken

▶ Alla gaser vi räknar på i kursen är ideala.

▶ Ideala gaslagen  $pV = mRT$  och  $pV = n\bar{R}T$   $R = \frac{\bar{R}}{M}$

▶  $\bar{R} = 8.3143$  [J/mol K] universella gaskonstanten,  
 $R = \bar{R}/M$  [J/kg K] gaskonstanten.

▶ För en ideal gas gäller  $c_p - c_v = R$   
(utgå från  $h = u + pv$  och  $pv = RT$ )

▶ Kan med  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  få följande uttryck  $c_v = \frac{R}{\gamma-1}, c_p = \frac{R}{1-1/\gamma}$

▶ Alla gaser vi räknar på har  $c_p$  och  $c_v$  konstanta.

20 / 36

## Termodynamiska system och processer

### System

- ▶ Isolerat
- ▶ Slutet
- ▶ Öppet

### Processer

- ▶ *Isobar*: samma tryck  $dp = 0$
- ▶ *Isokor*: samma volym  $dV = 0$
- ▶ *Isoterm*: samma temp.  $dT = 0$
- ▶ *Adiabatisk*: inget värmeutbyte  $dQ = 0$
- ▶ *Reversibel*:  $dW = p dV$
- ▶ *Isentropisk*: adiabatisk + reversibel (den bästa processen)

21 / 36

## Isentropisk kompression och expansion – Ideal gas

### Isentropisk betyder

- ▶ Ingen värmeöverföring  $dq = 0$
- ▶ Reversibel process  $dw = p dv$

–Söker samband som beskriver hur tillståndet förändras under processen

Utgå från 1:a Huvudsatsen

$$dq = du + dw \Rightarrow 0 = c_v dT + p dv$$

Ideal gas  $p = \frac{RT}{v}$ :

$$c_v dT = -\frac{RT}{v} dv \Leftrightarrow \frac{1}{T} dT = -\frac{R}{c_v} \frac{1}{v} dv \Leftrightarrow$$

$$\frac{1}{T} dT = -\frac{c_p - c_v}{c_v} \frac{1}{v} dv \Rightarrow \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{T} dT = -(\gamma - 1) \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{v} dv$$

22 / 36

## Isentropisk kompression och expansion – Ideal gas

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{T} dT = -(\gamma - 1) \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{v} dv \Rightarrow \ln T_2 - \ln T_1 = -(\gamma - 1)(\ln v_2 - \ln v_1)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma - 1}$$

$$\left[T = \frac{pV}{R}\right] \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma} \Leftrightarrow p_2 v_2^{\gamma} = p_1 v_1^{\gamma}$$

$$\left[v = \frac{RT}{p}\right] \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$$

### Viktigaste ekvationen

$$p v^{\gamma} = \text{konstant}$$

23 / 36

## Isokor process (konstant volym) – t.ex. förbränning

- ▶ Frigjord energi från bränslet

$$Q_{in} = \min(\lambda, 1) \cdot m_f \cdot q_{LHV}$$

- ▶ Konstant volym  $dV = 0$
- ▶ 1:a huvudsatsen (energiekvationen)

$$dQ = dU + p dV \Rightarrow dQ = dU$$

- ▶ Inre energi  $U = m u \Rightarrow dU = m_{tot} du = m_{tot} c_v dT$
- ▶ Integrera 1:a huvudsatsen

$$\int_0^{Q_{in}} dQ = \int_{T_2}^{T_3} m_{tot} c_v dT \Rightarrow Q_{in} = m_{tot} c_v (T_3 - T_2)$$

24 / 36

## Isobar process (konstant tryck) – t.ex. förbränning

- Frigjord energi från bränslet

$$Q_{in} = \min(\lambda, 1) \cdot m_f \cdot q_{LHV}$$

- Konstant tryck  $dp = 0$

- Entalpidefinitionen + 1:a huvudsatsen

$$H = U + pV \Rightarrow dU = dH - p dV - V dpn$$

$$dQ = dU + p dV = dH - V dp \Rightarrow dQ = dH$$

- Entalpi  $H = m h \Rightarrow dH = m_{tot} dh = m_{tot} c_p dT$

- Integrera 1:a huvudsatsen

$$\int_0^{Q_{in}} dQ = \int_{T_2}^{T_3} m_{tot} c_p dT \Rightarrow Q_{in} = m_{tot} c_p (T_3 - T_2)$$

25 / 35

## Innehållsförteckning

Repetition

Arbetsprinciper och Momentgenerering

Sammanfattning av termodynamiken

Motor cykelräkning

Jämförelse mellan modell och mätning

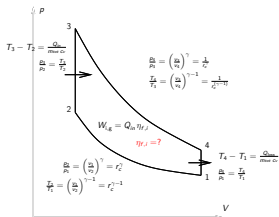
De ideala cyklernas effektivitet

Motor, mer om arbetsprinciperna

26 / 35

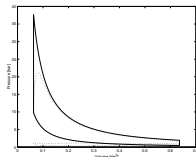
## Cykelräkning – $p_1$ och $T_1$ givna

Termodynamiken ger systematisk metod för att räkna runt cykeln



27 / 35

## Jämförelse mellan mätning och modell



28 / 35

## Ideala Ottocykelns effektivitet

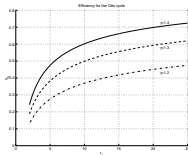
- ▶ Verkningsgrad  $\eta_{\text{otto}} = \frac{\text{Arbete ut}}{\text{Tillförd energi}}$
  - ▶ Känner "tillförd energi"  $Q_{\text{in}}$
  - ▶ Två sätt att beräkna "arbete ut"  $W_{\text{out}}$ 
    - Integrera arean  $W_{\text{out}} = \oint p dV$   
Lösa två integraler  $\int c \cdot V^{-\gamma} dV$
    - Första lagen: efter en cykel har  $U$  inte ändrats
- $$dQ = dU + dW \Rightarrow \Delta Q = \Delta W$$
- $$\Delta W = W_{\text{out}} \quad \Delta Q = Q_{\text{in}} - Q_{\text{loss}}$$
- ▶  $\eta_{\text{otto}} = \frac{W_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{Q_{\text{in}} - Q_{\text{loss}}}{Q_{\text{in}}} = 1 - \frac{Q_{\text{loss}}}{Q_{\text{in}}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}}$

29 / 36

## Ottocykelns effektivitet

$$\eta_{r,i} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}}$$

Normalfall  $\gamma = 1.3$



Jämför  $r_c = 10$  med  $r_c = 5$   
i ett pV-diagram.  
Var förlorar man?

30 / 36

## Innehållsförteckning

Repetition

Arbetsprinciper och Momentgenerering

Sammanfattning av termodynamiken

Motor cykelräkning

**Motor, mer om arbetsprinciperna**  
pV diagrammet och andra cykler  
Knack – En begränsning

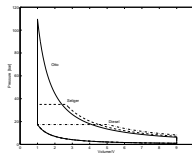
31 / 36

## Cykeleffektiviteten och pV-diagrammet

$$\eta_{r,i} = \frac{W}{Q_{\text{in}}}$$

Förutsättning:  
Samma  $Q_{\text{in}}$ .

Vad syns i diagrammet?



$\eta_{\text{Otto}} > \eta_{\text{Seiliger}} > \eta_{\text{Diesel}}$

32 / 36



## Cykeffektivitet forts.

Dieselrykel eller cykel med konstant-tryck

$$\eta_{r,i} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}} \frac{\beta^{\gamma} - 1}{(\beta - 1)\gamma}$$

Seilgericykel eller cykel med begränsat-tryck

$$\eta_{r,i} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}} \frac{\alpha\beta^{\gamma} - 1}{\alpha(\beta - 1)\gamma + \alpha - 1}$$

**Notera** att Dieselrykeln ( $\alpha = 1$ )  
och Ottocykeln ( $\alpha = 1$  och  $\beta = 1$ )  
är specialfall av Seilgericykeln.

–Alla cykler säger att vi skall ha högt kompressionstal!  
–Vad är haken?

## Några kolvar som utsatts för knack

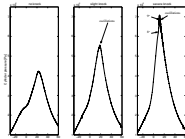


- ▶ Knack (spikning) och oktantal hänger samman  
Oktantalet är bränslets motstånd mot självantändning.
- ▶ Krav på styrsystemet  
–Hantera olika bränslen.

33 / 36

34 / 36

## Knack – En begränsning för bensenmotorer



–Knack kan förstöra motorn!  
–Mer om det nästa läsperiod...

### Repetition

Luft och bränsle  
Modellvalidering

### Arbetsprinciper och Momentgenerering

Arbetscykeln  
Grundläggande begrepp  
Termodynamik

### Sammanfattning av termodynamiken

Termodynamiska system, processer, och cykler

### Motor cykelräkning

Jämförelse mellan modell och mätning  
De ideala cyklernas effektivitet

### Motor, mer om arbetsprinciperna

pV diagrammet och andra cykler  
Knack – En begränsning

35 / 36

36 / 36