

TSFS05 – Fordonssystem – Fö 4  
Principer och modellering för motormoment

Lars Eriksson - Kursansvarig

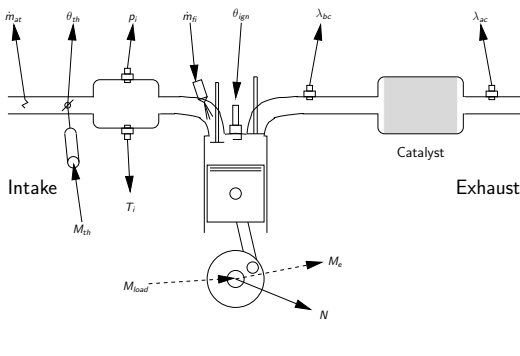
Fordonssystem, Institutionen för Systemteknik  
Linköpings universitet  
laxe@isy.liu.se

September 5, 2011

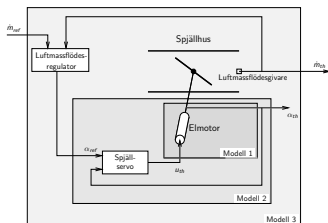
Luft och bränsle → Arbete och emissioner

Medelvärdesmodellering

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



Trotteflödesmodeller (förslag till laborationen 1c)

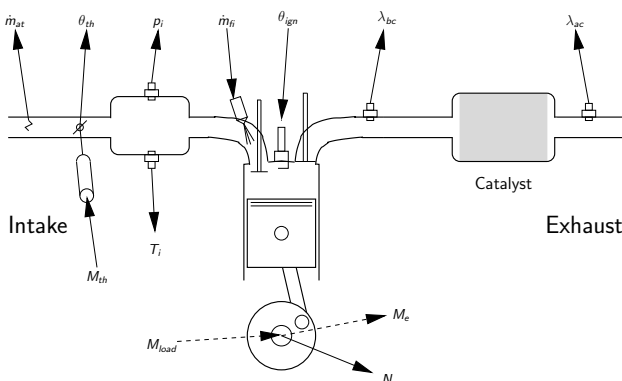


Fyra modeller (tre numererade):

- Modell 1: Trottelrörelse  $u_{th} \rightarrow \alpha$
- Modell 2: Trotteleservo  $\alpha_{ref} \rightarrow \alpha$
- Modell 3: Luftmassflödesregulator:  $\dot{m}_{at,ref} \rightarrow \dot{m}_{at}$

Modellsammanfattning – Luft och bränsle

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



Repetition

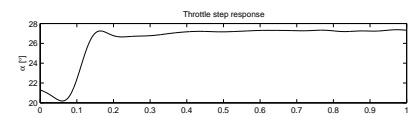
- MVEM
- Reglering – Reglermål
- (A/F) reglering
- Lambda reglering

Motor, arbetsprinciper

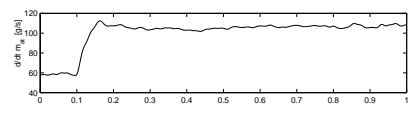
Motor – Repetition – Medelvärdesmodeller

Målet är modeller som beskriver denna typ av signaler.  
Jämför tidskonstanten med 3000 rpm = 50 rps  $\Rightarrow$  0.02 s/varv

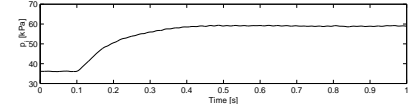
Steg i trottelt (aktuator)



Luftflöde (sensor)



Tryck (sensor)



Luftflödesmodell för trottelt

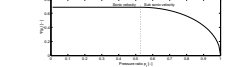
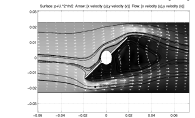
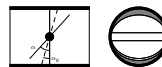
Kompressibel isentropisk strömning genom en strypning.

$$\dot{m}_{at} = \frac{p_a}{\sqrt{RT_a}} \cdot A_{th}(\alpha) \cdot C_{th}(\alpha) \cdot \Psi(p_r)$$

Area  $A_{th}(\alpha)$

Kontraktion  $C_{th}(\alpha)$

Ljudhastigheten



$$\Psi(p_r) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{\gamma} \left( \frac{p_r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - p_r^{-\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{p_r - 1} \right)} & p_r > \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \\ 1 & p_r \leq \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \end{cases}$$

Modellsammanfattning 1(2)

Gaspedalstolkning

$$\dot{m}_{at,ref} = (\dot{m}_{at,max}(N) - \dot{m}_{at,min}) \cdot u_{pedal} + \dot{m}_{at,min} \quad \text{där } u_{pedal} \in [0, 1]$$

Luftflöde in i insugsröret

$$\dot{m}_{at} = H(s) \dot{m}_{at,ref}$$

Luftflöde in i cylindern

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

Tryckupbyggnad i insugsröret

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{R T_i}{V_i} \frac{dm_i}{dt} = \frac{R T_i}{V_i} (\dot{m}_{at} - \dot{m}_{ac})$$

## Modellsammanfattning 2(2)

Bränsleinjektor

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

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

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

Transportfördröjning

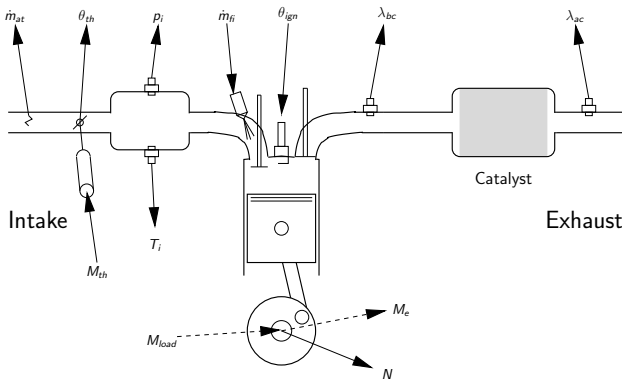
$$\lambda_{exh}(t) = \lambda(t - \tau_d(N))$$

Sensordynamik

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

## Emissioner före och efter katalysatorn

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



## Innehållsförteckning

Repetition

MVEM

Reglering – Reglermål

(A/F) reglering

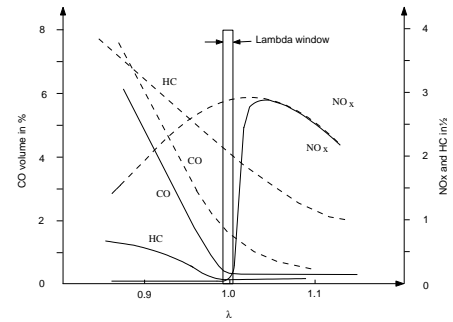
Lambda reglering

Motor, arbetsprinciper

## Trevägskatalysatorn och lambdafönstret

streckad - före katalysatorn

heldragen - efter katalysatorn



Avgasrening med trevägskatalysator - kräver reglering

## $\lambda$ -reglering ( $\lambda = 1 \pm 0.03$ )

▶ Hårt krav och modellosäkerheter  $\Rightarrow$  **Återkoppling** nödvändig.

- ▶ Stationärt  $\lambda = 1$ :
- ▶ Återkoppling från (diskret)  $\lambda$ -sensor.

▶ Tidsfördröjning  $\tau_d(N)$   $\Rightarrow$  **Framkoppling** nödvändig.  
-Enbart återkoppling räcker ej under transienter.

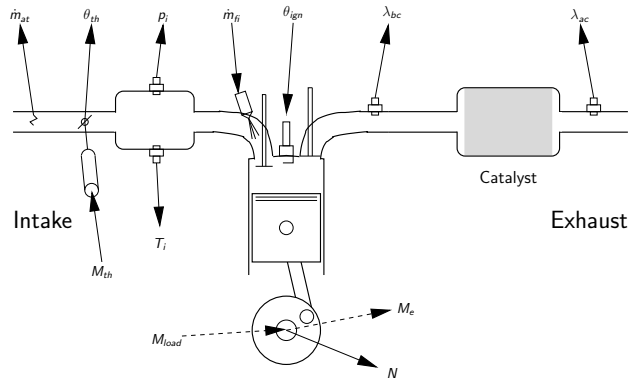
- ▶ Transient:
- ▶ Framkoppling från t.ex. pedalrörelse eller varvtalsförändring.

▶ Två olika principer

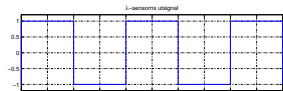
Speed density – Mass air flow.

## Återkoppling med reläsensorn

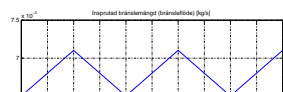
Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



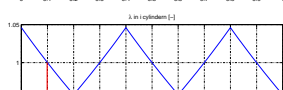
## Integrerande regulator



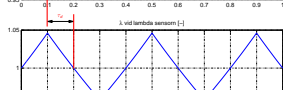
$\lambda_{sond}(t)$



Bränsle:  $u(t) = K_I \int \lambda_{sond}(t) dt$



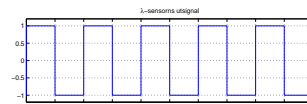
$\lambda_{motor}(t) = \frac{K_{luft}(t)}{u(t)}$



$\lambda_{avgas} = \lambda_{motor}(t - \tau_d)$

Självsvängningstid  $T = 4\tau_d$

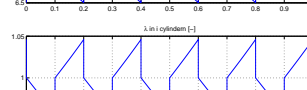
## PI regulator



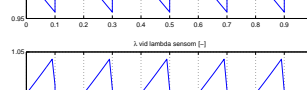
$\lambda_{sond}(t)$



$u(t) = K_P \lambda_{sond}(t) + K_I \int \lambda_{sond}(t) dt$   
 $K_P = \frac{1}{2} \tau_d K_I$



$\lambda_{motor}(t) = \frac{K_{luft}(t)}{u(t)}$



$\lambda_{avgas} = \lambda_{motor}(t - \tau_d)$

Självsvängningstid  $T = 2\tau_d$

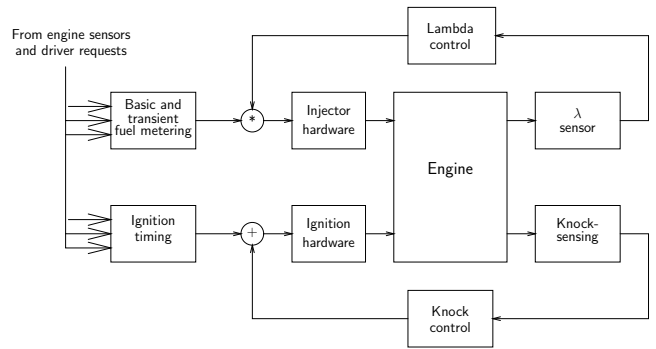
# Innehållsförteckning

- Repetition
- MVEM
- Reglering – Reglermål
- (A/F) reglering
- Lambda reglering

## Motor, arbetsprinciper

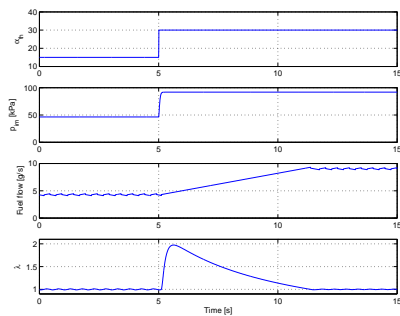
# Framkoppling för λ-reglering – Transienter

Viktigaste reglerlooparna för bensin motorer. Den översta är *lambda-regulatorn* och den nedersta är *tändningsregulatorn*.



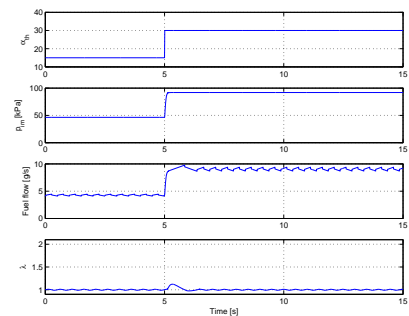
## Varför är inte återkoppling tillräckligt?

Reläsensor, tidsfördröjning, hårda krav på lambda stationärt begränsar förstärkningen.



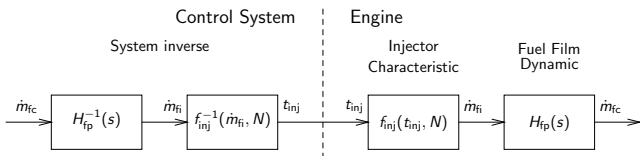
## λ-reglering – Framkopplingsloopen

Reglering med framkoppling (ingen bränslefilmskompensering)



## Framkopplingsloop - Bränslefilm och injektor

Grundläggande princip – Systeminvertering (statisk, dynamisk)



Om bränslefilmen är ett LTI-system kan man använda  $H_{fp}(s)$

$$\begin{cases} \frac{dm_{fp}}{dt} = X \dot{m}_{fi} - \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp} \\ \dot{m}_{fc} = (1 - X) \dot{m}_{fi} + \frac{1}{\tau_{fp}} m_{fp} \end{cases} \Leftrightarrow \dot{m}_{fc} = \underbrace{\left[ (1 - X) + \frac{X}{s \tau_{fp} + 1} \right]}_{H_{fp}(s)} \dot{m}_{fi}$$

X och  $\tau_{fp}$  beror på arbetspunkt  $\Rightarrow$  Använd en observatör

# Innehållsförteckning

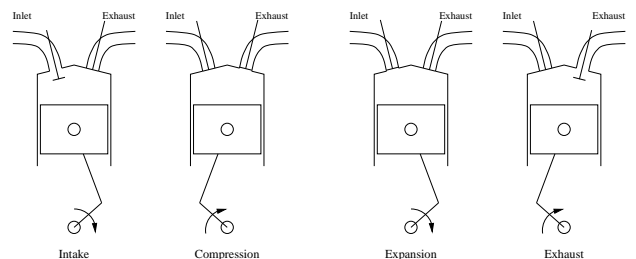
Repetition

Motor, arbetsprinciper

## Nästa område: Cykel-modellering

- ▶ Arbetscykeln
- ▶ Grundläggande begrepp
- ▶ Termodynamik
- ▶ Tillämpning på cykel

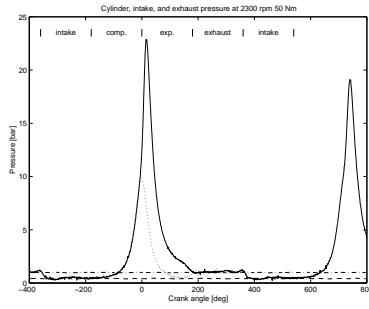
## Fyrtaktsprincipen



En cykel = 2 varv =  $4\pi$

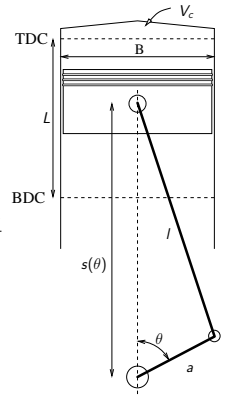
# Indikatordiagram

Indikatordiagram – Cylindertryck som funktion av vevaxelvinkel  $\theta$



# 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	$V_d = \frac{\pi B^2 L}{4}$



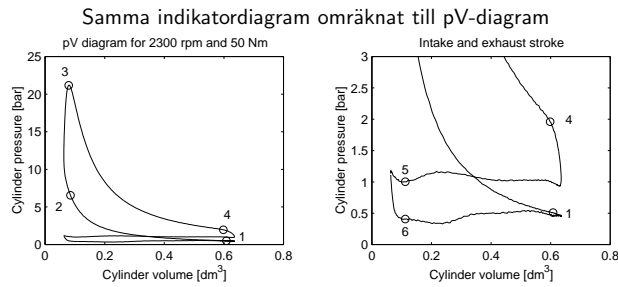
$$r_c = \frac{\text{maximum cylinder volume}}{\text{minimum cylinder volume}} = \frac{V_d + V_c}{V_c}$$

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

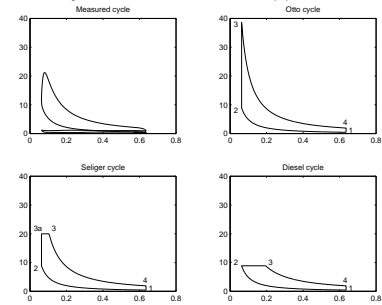
$$s(\theta) = a \cos \theta + \sqrt{l^2 - a^2 \sin^2 \theta}$$

# Indikatordiagram

# Cyklar



Termodynamiska cykler som modell av uppmätt indikatordiagram



Varför pV-diagram?

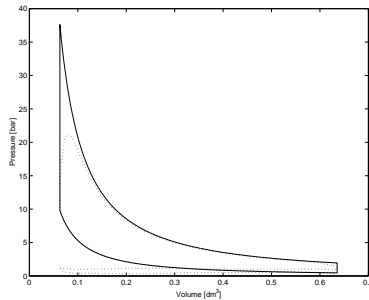
–Arbetet kan räknas fram genom  $W = \oint p dV!$

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

Dieselmotor  $\neq$  Dieselrykel

# Jämförelse mellan mätning och modell

# 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

$$H = U + pV$$

$$h = u + pv$$

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

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

1:a H. (igen)

$$dQ = dH - V dp$$

$$dq = dh - v dp$$

Värmekapacitet

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

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

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

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

Samband:

$$du = c_v dT$$

$$dh = c_p dT$$

Ratio of specific heats

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

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

# En kort sammanfattning av termodynamiken

# Repetition

MVEM

Reglering – Reglermål

(A/F) reglering

Lambda reglering

# Motor, arbetsprinciper

- ▶ Alla gaser vi räknar på i kursen är ideala.
- ▶ Ideala gaslagen  $pV = mRT$  och  $pV = n\tilde{R}T$   $R = \frac{\tilde{R}}{M}$
- ▶  $\tilde{R} = 8.3143$  [J/mol K] universella gaskonstanten,  $R = \tilde{R}/M$  [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.