

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

Fö 1 – Kursinformation, Grundläggande om motorn,  
Medelvärdesmodellering för luft och bränsle

Lars Eriksson - Kursansvarig

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

September 1, 2025

# Återkoppling och åtgärder

## Återkoppling

- 2023: 28 deltagare, 9 (32%) svar
- Positiv feedback på läromål och relevans
- Medelbetyg: 2.78 (Första gången kursen gavs med ny ung lärare)
- Problem: Arbetsbelastning.
  - Felsökning i egna implementationer, kommer inte framåt, frustration.

## Åtgärder

- Minskat antal modeller att implementera.
- Förbättrat arbetsflöde, implementering och test.
- Tydligare instruktioner och exempel på arbetsflöde i kursmaterialet.
- Uppdatering och kvalitetskontroll pågår.

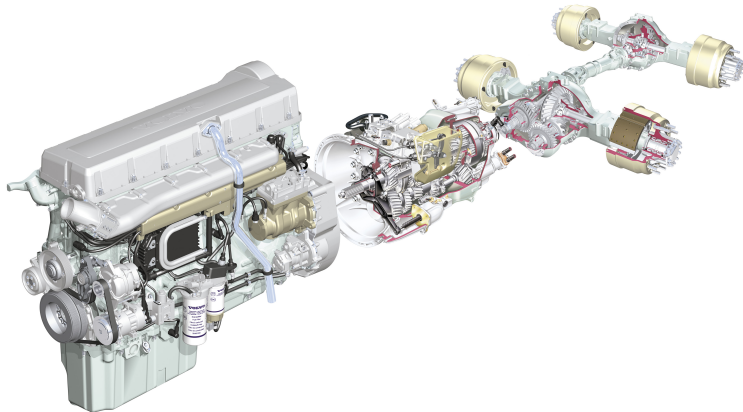
# Innehållsförteckning

- 1 Återkoppling och åtgärder
- 2 Kursinformation
- 3 Grundläggande om motor
- 4 Motor – Principer
- 5 Medelvärdesmodellering

# Modellering och Reglering av Motorer och Drivlinor

## Kursens Mål är att ge er:

- bakgrund och förståelse för de styrsystem som finns för motor och drivlina
- grunden för att utveckla framtidens styrsystem för motor och drivlina

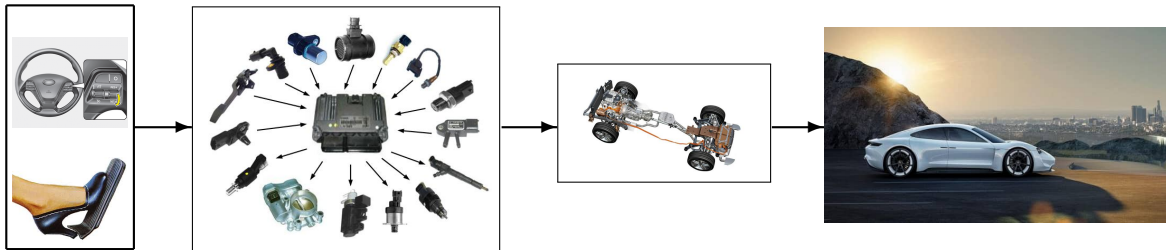


## Vilka är de viktigaste egenskaperna för ett fordon?

- effektivt arbete = låg bränsleförbrukning
- låga emissioner = god miljö
- körbarhet
- *säkerhet*

-Styrsystemen har fundamental betydelse för vi skall att nå dessa!

# Uppgiften för motor och drivlinestyrningen



## Uppgiften

- Omvandla sensorsignaler till styrsignaler
- Uppfylla förarens önskan om körupplevelse
- Uppfylla lagstiftade utsläppskrav
- Säkerställa säker drift av framdrivningssystemet

# Genomgång av kursinformationen

## Information om projektuppgifter

<https://isy.gitlab-pages.liu.se/fs/courses/TSFS09/>

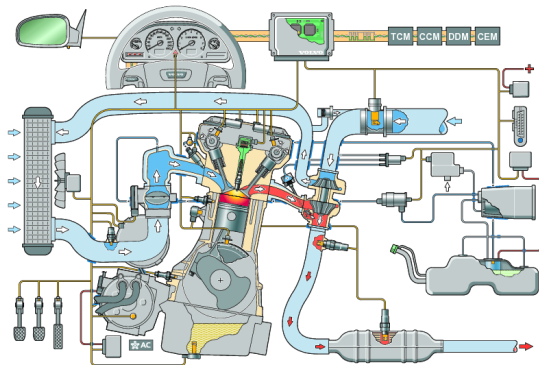
## Rapportinlämning och uppföljning

<http://lisam.liu.se/> TSFS09 (Under uppbyggnad)

## Viktiga punkter

- Uppgiftsdelen är 3 miniprojekt (utförs i grupper om max 2)
- Följer målen på förra OH
- Projekt 3+2+1 hp
- Sju inlämningar - Se hemsidan för datum
- Inlämningar och uppföljning i Lisam.
- Fritt schemalagd moment 1A (motormätningen), 1h genomgång och besök i motorlaget
  - Anmälningslista, annonseras via Lisam efter Fö 2.
  - Obligatorisk närvaro i motorlabbet.
- Individuellt "lönesamtal" (några korta frågor på projekten)
- Godkända projekt ger betyg 3. Skriftlig tentamen för högre betyg 4 & 5.

# Frivillig laboration?



## Samarbete med M-verkstan

- Fullständig demontering av en turbomotor, och därefter ihopmontering.
- Utförs på helgtider i grupper om fem och startar kl 09.00.
- Slut senast kl 17 (det kan gå fortare).
- Intresseanmälan - handuppräckning.
- Anmälningslista - Webformulär, länk från Lisam.

# Vad finns det för svårigheter?

Hur beskriver man och var köper man en givare för:

- effektivt arbete
- låga emissioner
- körbarhet
- säkerhet

I kursen får ni jobba med exempel som tränar era färdigheter från, Kemi, Mekanik, Reglerteknik, Elektronik, Mätteknik, Analys, Linjär algebra, Programmering, m.fl.  
–Färdigheter som används i ingenjörsarbeten inom Mekatronik.

Genomgående tema – Mekatronikerns arbetsuppgifter

- Hur fungerar systemet och hur kan jag beskriva det?
- Modeller och simuleringar, ekvationer och differential ekvationer.

Styr- och reglersystem är idag fundamentala för att få önskad prestanda.

Exempel:

- Effektivt arbete:  
Det finns flera ledtrådar t.ex. tryck eller varvtalsvariationer.
- Låga emissioner:  
Sensortolkning och utvärdering. Nya sensorer. Diagnos.
- Körbarhet:  
Tolkning av förarens signaler och reglerdesign av trampsvar.
- Säkerhet:  
ABS, styrstabilitet (TSFS02), funktioner för systemskydd.

Dessutom förbättras pris och prestanda av:

- Nya lösningar
- Samdesign  
(Jämför med det mer allmänt kända att styrsystem möjliggör nya flygplanstyper t.ex. “instabila”.)
- Exempel:  
Nya motorlösningar: variabla ventiltider, SVC, ..  
Nya drivlinelösningar: 42 V, starter-generator, hybrider, ...

# Innehållsförteckning

- 1 Återkoppling och åtgärder
- 2 Kursinformation
- 3 Grundläggande om motor
  - Principer
  - Luft och bränsle
- 4 Motor – Principer
- 5 Medelvärdesmodellering

# Ett exempel

## Chrysler 2.2 liter 70-talet

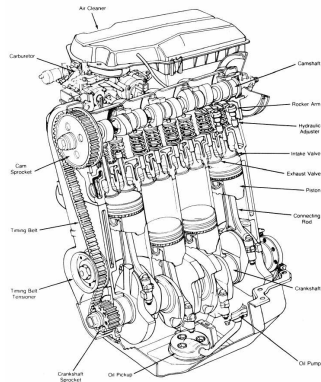
Grunddesignen innehåller samma komponenter idag.

Kontinuerlig förfining

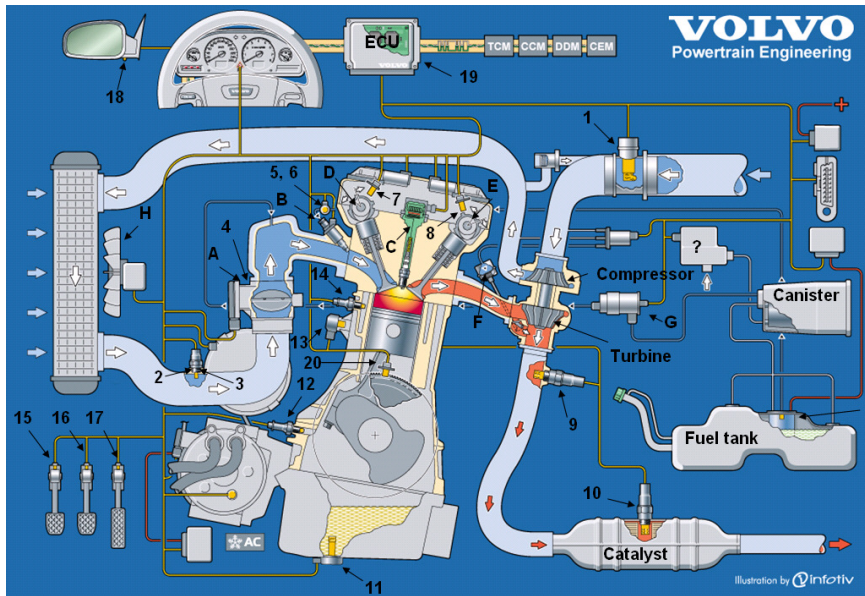
Motordelen behandlar *inledningsvis* fyrtakts Ottomotorer (bensinmotor)

## Reklampaus

⇒ Frivilliga laborationen.



# Ett till exempel – Turbomotor



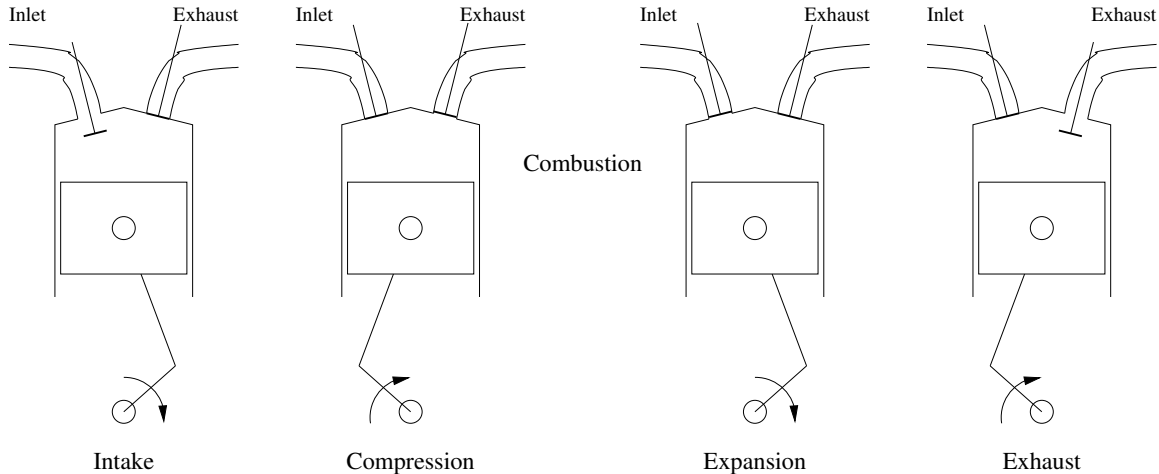
## Aktuatorer:

- A. Trottell
- B. Bränsleinjektorer
- C. Tändstift
- D. IVVT (Inlet Valve, Variable Timing)
- E. EVVT (Exhaust Valve, Variable Timing)
- F. TCV (Turbo Control Valve)
- G. EVAP-ventil
- H. Fläkt
- I. Bränslepump

## Sensorer:

- 1. Luftmassflöde
- 2. Insugstryck
- 3. Insugstemperatur
- 4. Trottelvinkel
- 5. Bränsletryck
- 6. Bränsletemperatur
- 7. Insugsventilstiming
- 8. Avgasventilstiming
- 9. Linjär lambda sensor
- 10. Binär(diskret) lambda sensor
- 11. Oljetemperatur
- 12. Oljetryck
- 13. Knackdetektor
- 14. Kylvattentemperatur
- 15. Kopplingspedal
- 16. Bromspedal
- 17. Gaspedal
- 18. Omgivningstemperatur
- 19. Omgivningstryck
- 20. Vevaxelvinkel och motorvarvtal

# Fyrtaktsprincipen

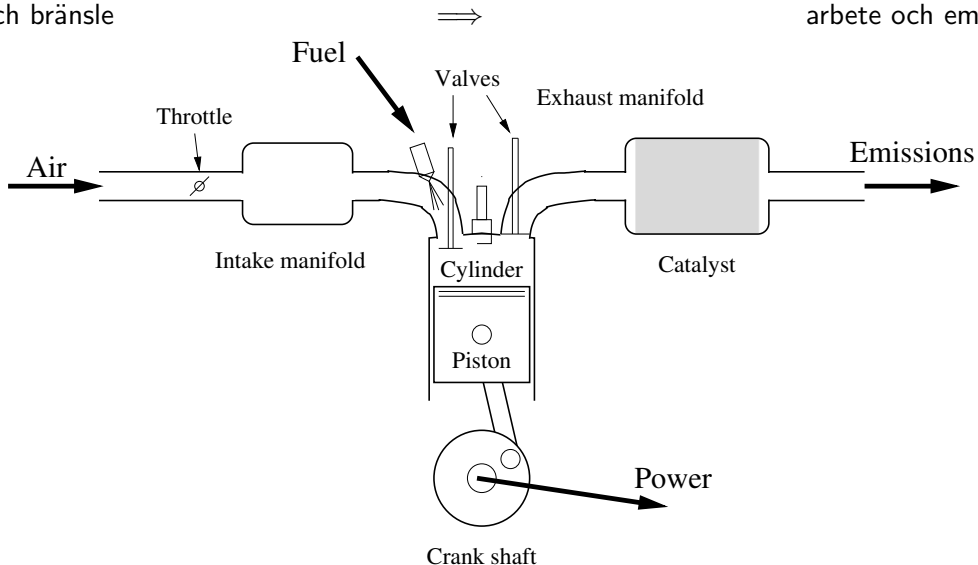


En cykel = 2 varv =  $4\pi$  ( $= n_r 2\pi$ , med  $n_r = 2$ )

# En viktig bild

Luft och bränsle

arbete och emissioner



## Innan vi går in på grundläggande beskrivning och principer

–Vad är det som är svårt?

–Vilka ambitioner (drömmar) finns?

# Innehållsförteckning

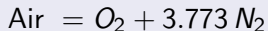
- 1 Återkoppling och åtgärder
- 2 Kursinformation
- 3 Grundläggande om motor
- 4 Motor – Principer
  - Luft
  - Bränsle
  - Förbränning och luft/bränsle-förhållande
- 5 Medelvärdesmodellering

## Vad är luft?

| Constituent    | Symbol | Molar mass | Volume [%] | Mass [%] |
|----------------|--------|------------|------------|----------|
| Oxygen         | $O_2$  | 31.999     | 20.95      | 23.14    |
| Nitrogen       | $N_2$  | 28.013     | 78.09      | 75.53    |
| Argon          | $Ar$   | 39.948     | 0.93       | 1.28     |
| Carbon dioxide | $CO_2$ | 44.010     | 0.03       | 0.05     |
| Neon           | $Ne$   |            |            |          |
| Helium         | $He$   |            |            |          |
| ⋮              |        |            |            |          |

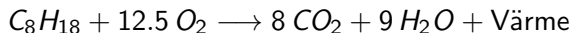
### En enkel modell

- Syre är syre.
- Allt annat är atmosfärsiskt kväve.



| Fuel              | Carbon | Hydrogen | Sulphur |
|-------------------|--------|----------|---------|
| 100-octane petrol | 85.1   | 14.9     | 0.01    |
| Motor petrol      | 85.5   | 14.4     | 0.1     |
| Diesel oil        | 86.3   | 13.6     | 0.9     |

Kemisk energi till termisk energi (värme)



Energivärde för ett bränsle:

$q_{HHV}$  – Higher heating value (vattnet i vätskeform *kondensering*)

$q_{LHV}$  – Lower heating value (vattnet i gasform)

Isooktan  $C_8H_{18}$  – ett vanligt referensbränsle

$$q_{HHV} = 47.8 \text{ [MJ/kg]}$$

$$q_{LHV} = 44.3 \text{ [MJ/kg]}$$

# Energibärare och energitäthet

Vikt för 1 kWh för olika alternativa energikällor.

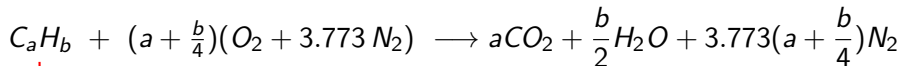
*(Källa: Ny Teknik 4 april 1996.)*

| Storage medium    | Weight/kWh |
|-------------------|------------|
| Lead Acid         | 34 kg      |
| Nickle Cadmium    | 18 kg      |
| Natrium Sulphur   | 10 kg      |
| Lithium Ion       | 10 kg      |
| Lithium Composite | 7 kg       |
| Air Zink          | 4.5 kg     |
| Gasoline          | 0.1 kg     |

- Bensin och diesel är (och kommer att vara) "lätta" drivmedelsalternativ för fordon.
- Alternativa bränslen i form av kolväten (biobränslen) dyker upp.

# Förbränning och stökiometri

- Perfekt förbränning av ett kolväte



- Stökiometriskt luft/bränsle-förhållande (en bränsleegenskap)

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

- Normaliserat luft/bränsle-förhållande

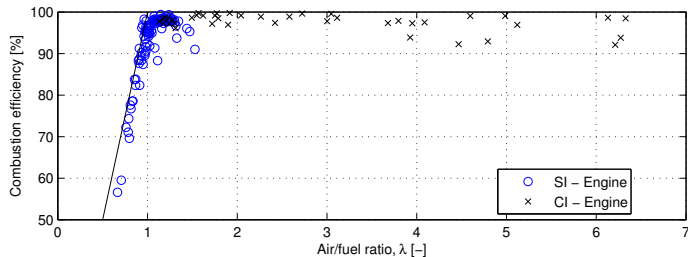
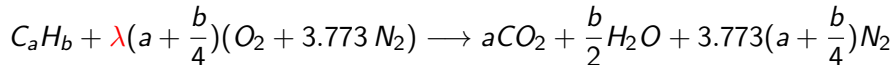
$$\lambda = \frac{(A/F)}{(A/F)_s} \text{ och } \phi = \frac{1}{\lambda}$$

## Frigjord värme och en enkel modell

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

# Luft/Bränsleförhållande och bränsleomvandlingsgrad

Perfekt  $\lambda = 1$  förbränning av ett kolväte



Fuel/air equivalence ratio  $\phi = \frac{1}{\lambda}$

Frigjord värme och en enkel modell

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

# Innehållsförteckning

- 1 Återkoppling och åtgärder
- 2 Kursinformation
- 3 Grundläggande om motor
- 4 Motor – Principer
- 5 Medelvärdesmodellering
  - Exempel på stegsvar
  - Trottellmodellering: Rörelse, reglering, luftflöde
  - Trottelflöde

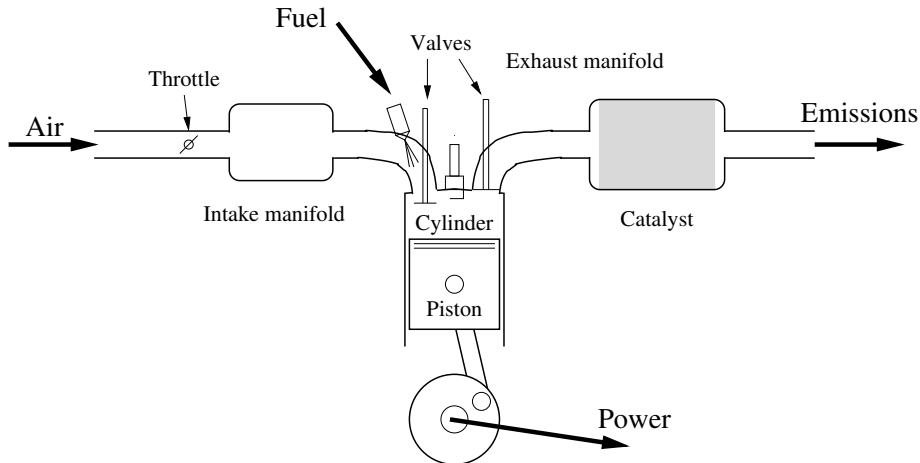
# Medelvärdesmodellering

Användning i industrin:

Reglera luft och bränsle.

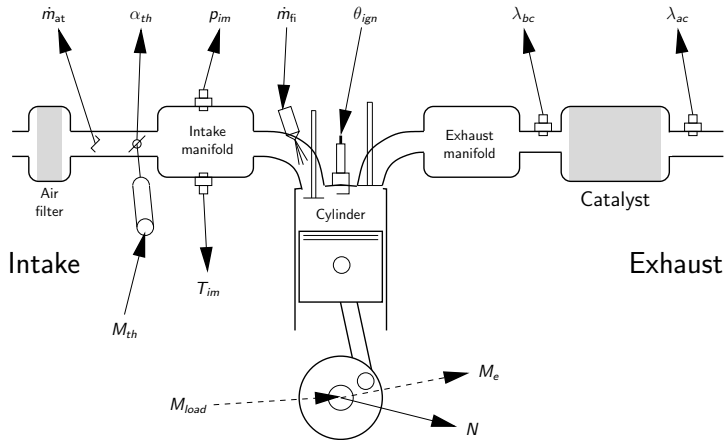
Simulera/analysera.

Diagnostisera.

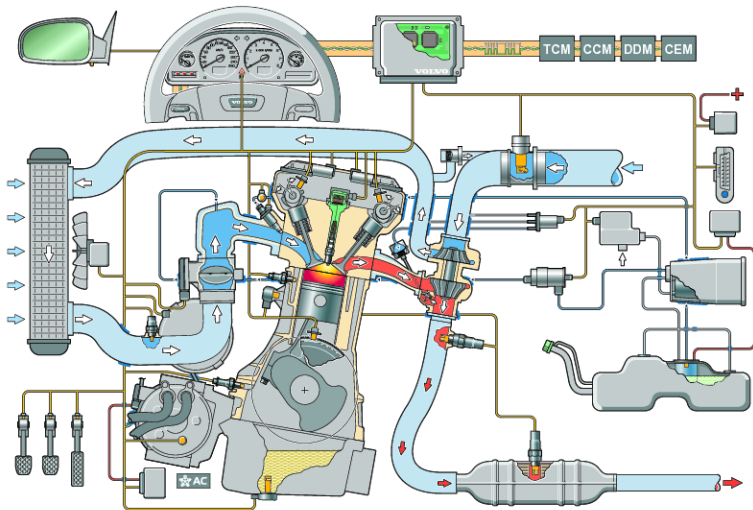


# Ett sensor - aktuator perspektiv

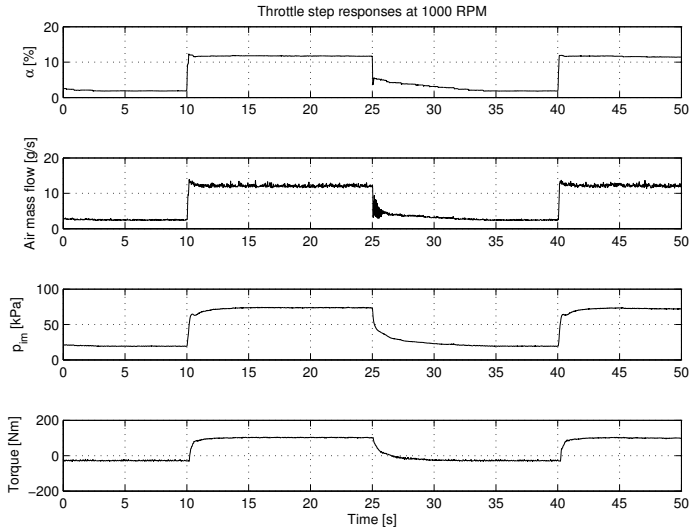
Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



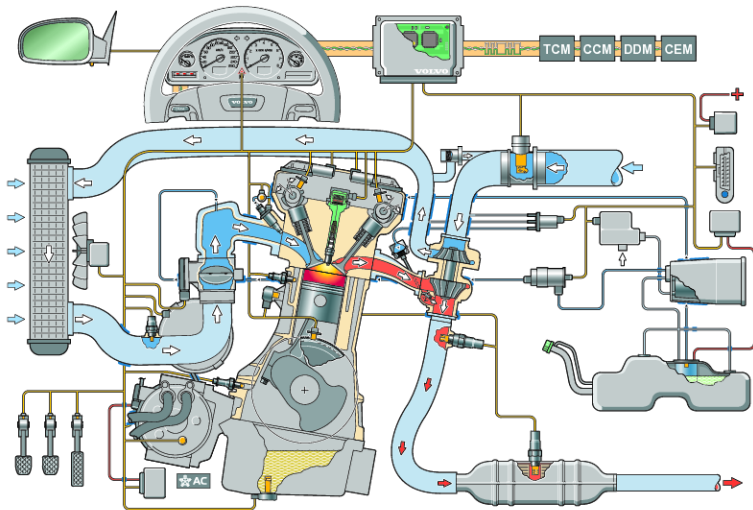
# Stegsvar: Trottelt $\rightarrow$ Luftmassflöde, Insugstryck, Moment



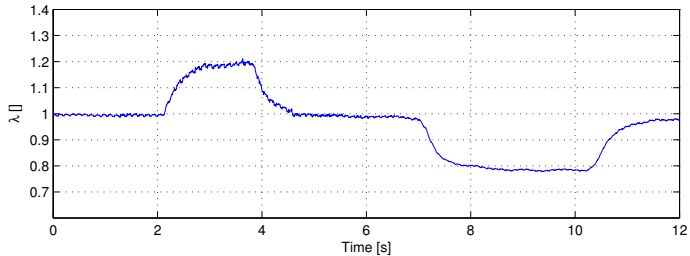
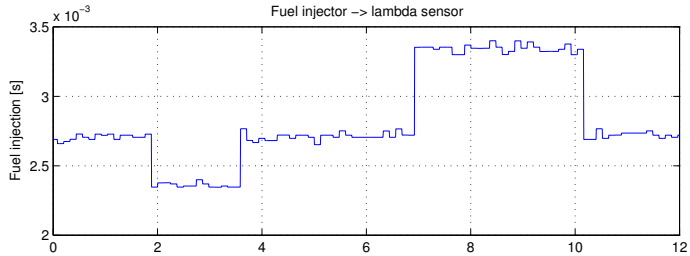
# Stegsvar: Trottelt $\rightarrow$ Luftmassflöde, Insugstryck, Moment



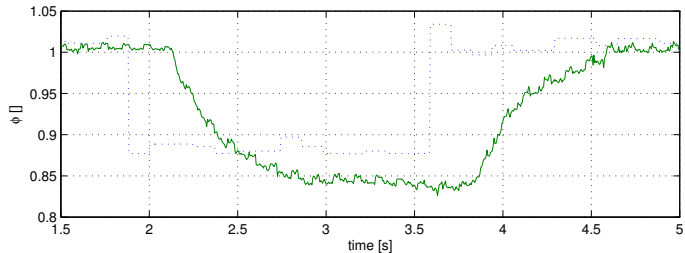
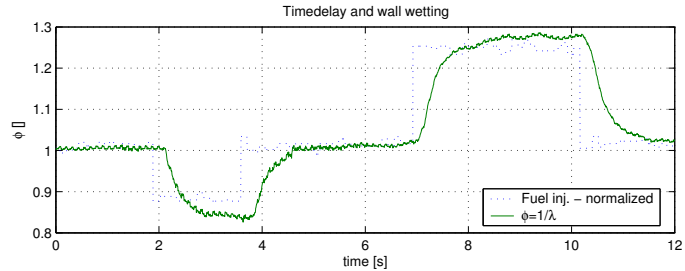
## Stegsvar: Bränsleinjektor → Lambda sensor



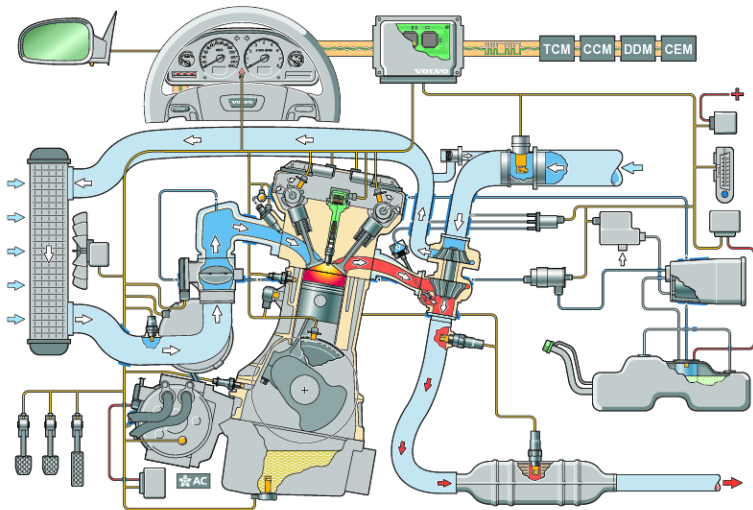
# Stegsvar: Bränsleinjektor → Lambda sensor



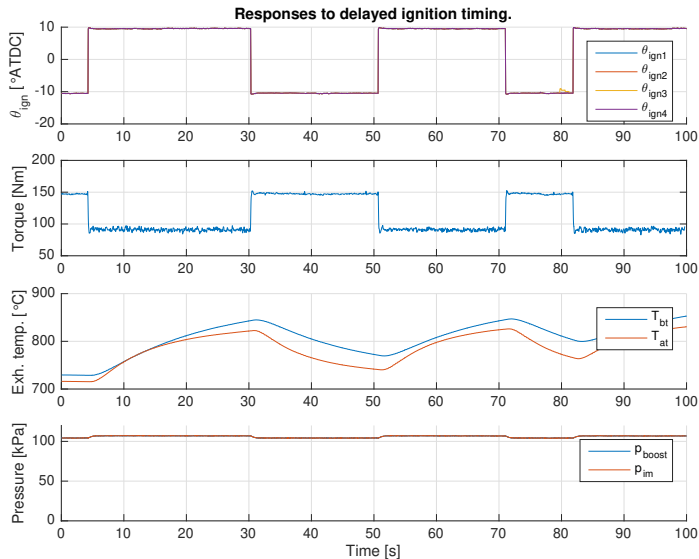
# Stegsvar: Bränsleinjektor → Lambda sensor



# Stegsvar: Tändning → Moment, Temperatur, Tryck



# Stegsvar: Tändning $\rightarrow$ Moment, Temperatur, Tryck



Varierar bara när tändningen sker

Bränsle konstant:

- Effektivitet
- Avgastemperaturer
- Snabb och Långsam dynamik.

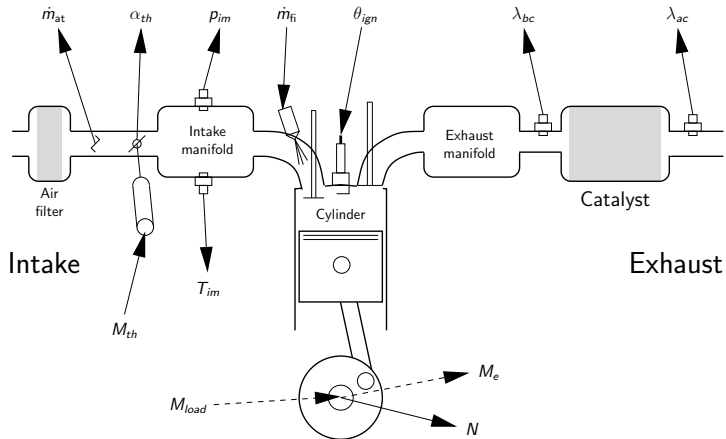
## Mean value engine models (MVEM)

Approximativa tidsskalor (det finns ingen skarp gräns):

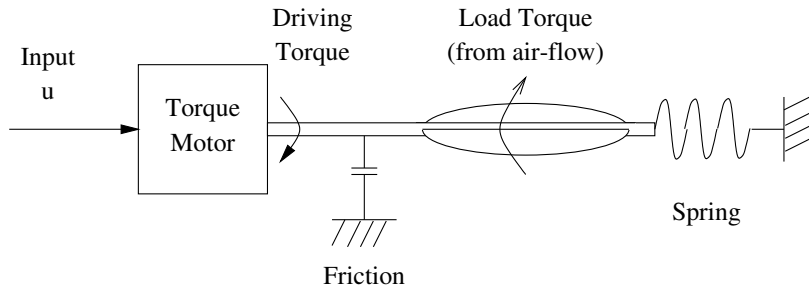
- ① changes that take in the order of  $\sim 3$ -1000 cycles to reach their final state are expressed by differential equations.
- ② changes faster than 1 cycle are expressed by static relations.
- ③ changes slower than 1000 cycle are expressed by constants.

# Modellering – Delsystem

Trottelvinkel, luftflöden ( $\dot{m}_{at}$ ,  $\dot{m}_{ac}$ ), tryck  $p_{im}$ , bränsleinjektor, bränsle film, transport av luft/bränsle, katalysator, sensorer, samt moment.



# Modell 1: Trottelt rörelse



Drivande moment,  $M_{th} \Rightarrow$  Trottelvinkel,  $\alpha$

Rörelsedynamik, DC-motor med återföringsfjäder (Newtons 2a lag)

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + a\frac{d\alpha}{dt} = b \cdot (M_{th} - M_{air}) - c \cdot (\alpha - \alpha_0)$$

Modellering av  $M_{air}$  är inte lätt (montering och aerodynamic)

**Användning:** Reglerdesign av trottelservo.

## Modell 2: Trottell med trottellregulator

- System med trottelservo + trottellaktuator

$$\alpha = G_{th}(s)\alpha_{ref}$$

- Behövs en dynamisk modell?

$$G_{th} = \frac{1}{s\tau_{th} + 1}$$

- Behövs en andra ordningens modell?

### Kärnfrågor vid modellering

- Vad skall modellen användas till?
- Vilken noggrannhet behövs?

– Våga förenkla, gärna skamlöst.

Luftflöde förbi gasspjäll (trottel)

Allmän ekvation för strypning

$$\dot{m}_{at} = \frac{p_{amb}}{\sqrt{R T_{amb}}} \cdot A \cdot C \cdot \Psi(\Pi)$$

$A$  – area

$C$  – “discharge coefficient” (formen på strypningen)

$\Psi(\Pi)$  – olinjär funktion av tryckförhållandet

$$\Pi = \frac{p_{im}}{p_{amb}}$$

$p_{amb}$  – tryck före

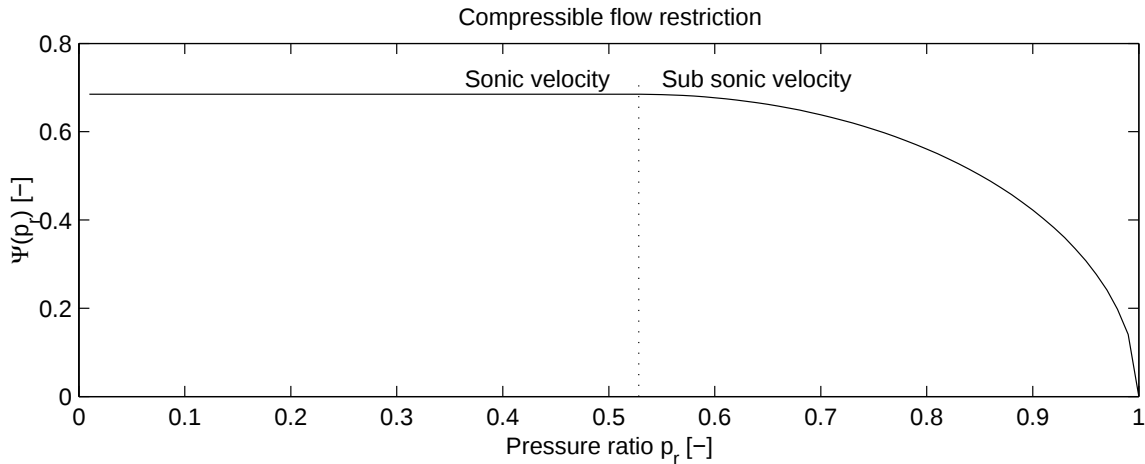
$p_{im}$  – tryck efter

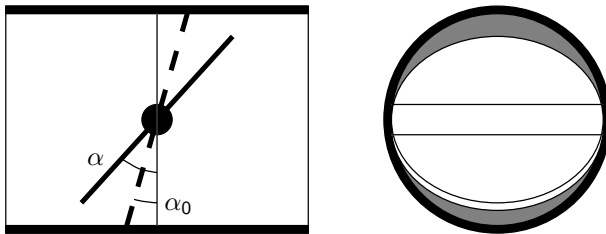
$$\psi(\Pi) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left( \Pi^{\frac{2}{\gamma}} - \Pi^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)} & \Pi > \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left( \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{2}{\gamma-1}} - \left(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

Flödeshastigheten begränsas av ljudhastigheten och den kritiska tryckkvoten är

$$\Pi_{crit} = \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

där  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ .





Gasspjäll med definition av vinkel för stängt spjäll  $\alpha_0$  och verklig vinkel  $\alpha$  i förhållande till spjällhuset.

Högra figuren visar flödesarean.

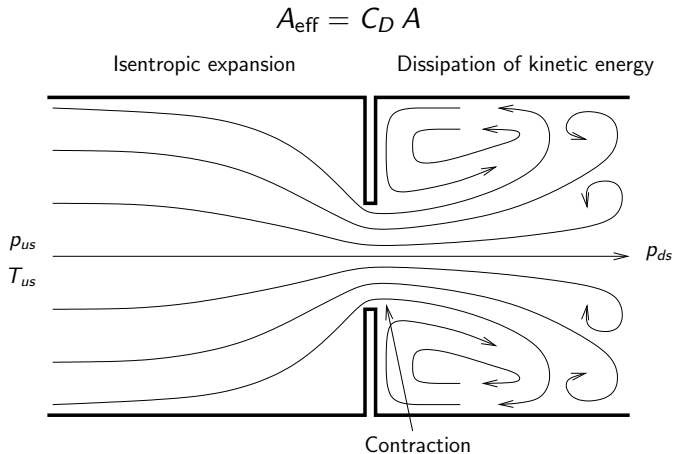
$$A_{th} = A_{th}(\alpha)$$

$$C_{th} = C_{th}(\alpha)$$

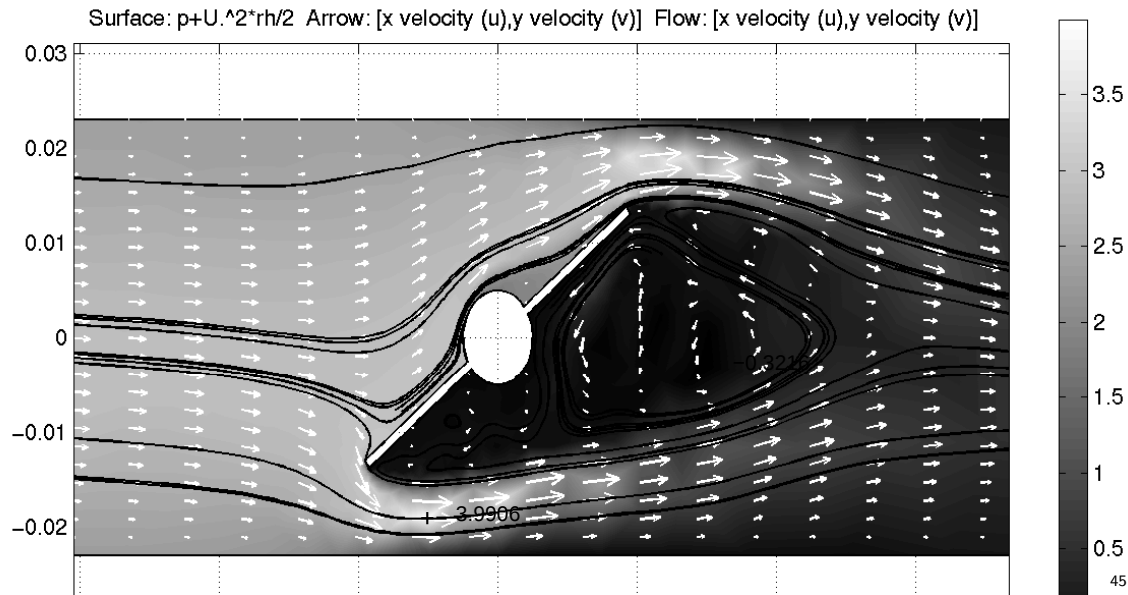
$$Q_{th}(\alpha) = A_{th}(\alpha)C_{th}(\alpha)$$

# Kontraktion – Discharge coefficient

Sammandragning av flödeslinjer



Effektiv area  $A_{eff}(\alpha) = A_{th}(\alpha)C_{th}(\alpha)$



## Modell 3: Luftintag – Ett system

Regulator för luftflödet och trottel.

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

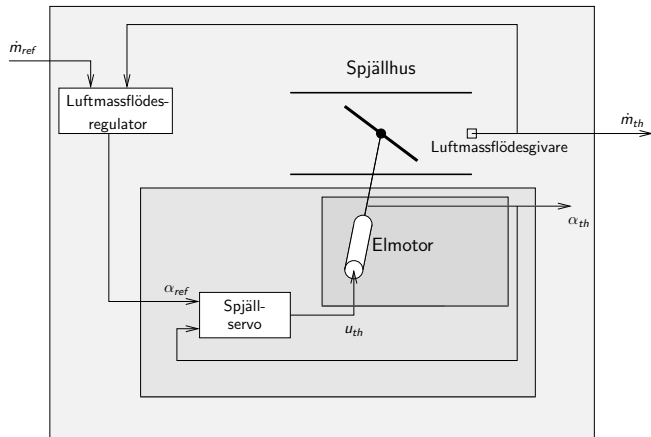
Statiskt eller dynamiskt system?

$$G_{at}(s) = \frac{1}{s\tau_{at} + 1}$$

Andra ordningens system?

# Sammanfattning av modellerna

Komplett system efter två reglerdesigner.



I projektet:  $\alpha_{ref} \rightarrow \alpha + \Psi(\Pi)$ -modellen för massflöde.

# Innehållsförteckning

- 1 Återkoppling och åtgärder
- 2 Kursinformation
- 3 Grundläggande om motor
  - Principer
  - Luft och bränsle
- 4 Motor – Principer
  - Luft
  - Bränsle
  - Förbränning och luft/bränsle-förhållande
- 5 Medelvärdesmodellering
  - Exempel på stegsvar
  - Trottellmodellering: Rörelse, reglering, luftflöde
  - Trottelflöde