

# TSFS05 – Fordonssystem – Fö 9

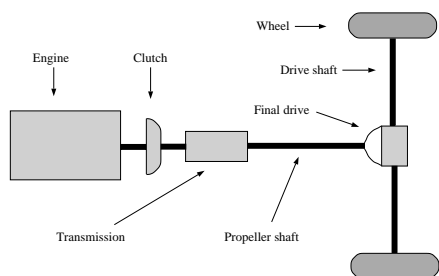
## Motor – Knack och knackreglering

Lars Eriksson - Kursansvarig

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

November 1, 2011

### Drivlina



### Drivlina – Reglering

Överföringsfunktion och analys mha rotort illustrerar principerna

Hastighetsreglering

–Motorvarvtal

–Hjulvarvtal

Momentreglering

–Växlingsreglering

### Innehållsförteckning

Repetition drivlina

Repetition - MVEM

Reglering – Huvudlooparna

Motor – Arbetsprinciper

Repetition: Momentmodellen

Motor – Knack

Motor – Tändningsreglering

### Innehållsförteckning

Repetition drivlina

Repetition - MVEM

Motor – Knack

Motor – Tändningsreglering

### Drivlina – Modellering

Stelkroppsmodellen

–Tillståndsval:  $\dot{\theta}_w$

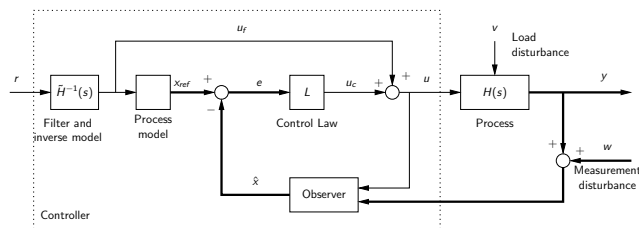
–Användningsområden: Kopplar motor till väglast

Drivlina med en elasticitet och två massor

–Tillståndsval:  $\dot{\theta}_w$ ,  $\theta_m$  och  $\frac{\theta_s}{T} - \theta_w$

–Användningsområden: Hastighets- och momentreglering.

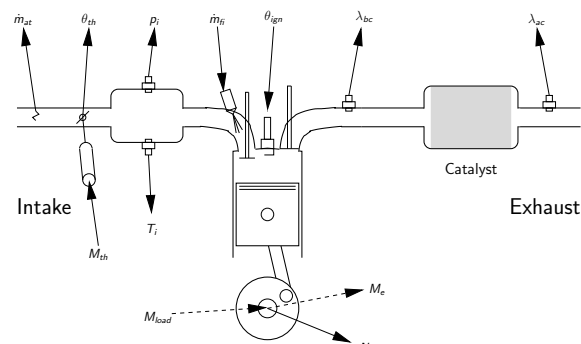
### Model-Based Control



### Luft och bränsle → Arbete och emissioner

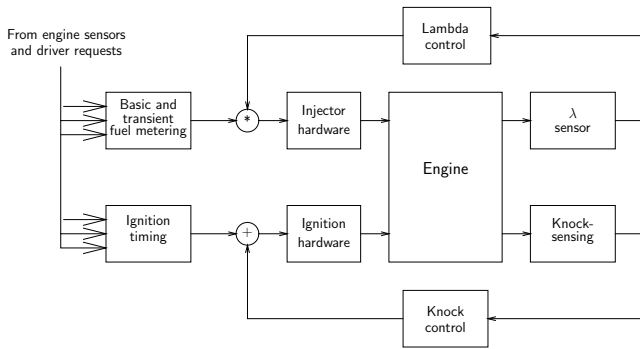
Medelvärdesmodellering

Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



## Huvudlooparna

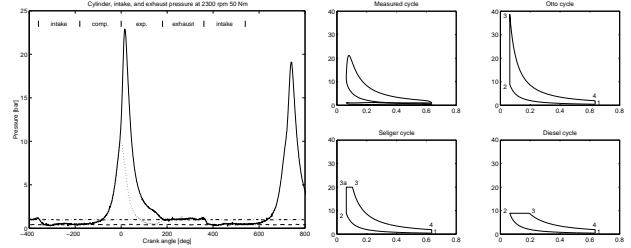
Viktigaste reglerlooparna för bensinmotorer. Den översta är *lambda-regulatorn* och den nedersta är *tändningsregulatorn*.



## Indikatordiagram

Cylindertryck som funktion av vevaxelvinkel  $\theta$ .

Termodynamiska cykler som modell av uppmätt indikatordiagram.



## 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

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

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

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

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

Samband:

$$du = c_v dT$$

$$dh = c_p dT$$

Ratio of specific heats

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

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

## Isentropisk kompression och expansion – Ideal gas

Isentropisk betyder

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

Utgå från 1:a Huvudsatsen

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

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

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

$$\frac{1}{T} dT = -\frac{c_p - c_v}{c_v} \frac{1}{V} dv \Rightarrow \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{T} dT = -(\gamma - 1) \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} dv$$

## 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

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

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

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

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

- ▶ Inre energi  $U = m u \Rightarrow dU = m_{tot} du = m_{tot} c_v dT$
- ▶ Frigjord energi från bränslet

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

- ▶ Integrera 1:a huvudsatsen

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

## Fri blandning

Ideal gas, konstant  $c_p$  och  $c_v$

Blandning av residualgaser  $T_r$  och fräska gaser  $T_i$

1:a lagen

Energi före:

$$U = (m_a + m_f) c_v T_i + m_r c_v T_r$$

Energi efter:

$$U = (m_a + m_f + m_r) c_v T_1$$

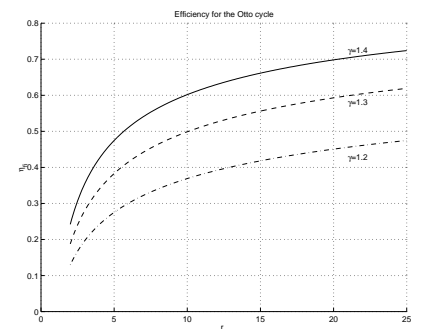
Temperatur efter

$$T_1 = \frac{m_a + m_f}{m_a + m_f + m_r} T_i + \frac{m_r}{m_a + m_f + m_r} T_r = (1 - x_r) T_i + x_r T_r$$

## Ottocykelns effektivitet

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

Normalfall  $\gamma = 1.3$



- Utgår från tillgänglig energi

$$W_{ig} = m_f q_{HV} \tilde{\eta}_{ig}(\lambda_c, \theta_{ign}, r_c, \omega_e, V_d)$$

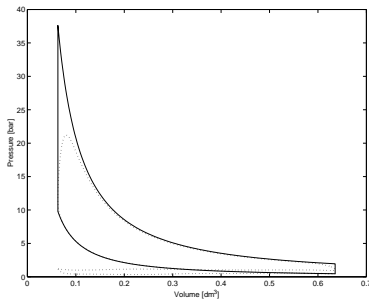
- Dra bort ideal Ottocykel samt verkliga förluster

$$\tilde{\eta}_{ig}(\lambda_c, \theta_{ign}, r_c, \omega_e, V_d) = \left(1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}}\right) \cdot \min(1, \lambda_c) \cdot \eta_{ign}(\theta_{ign}) \cdot \eta_{ig, ch}(\omega_e, V_d)$$

- Skillnad verklig/ideal  $\eta_{ig, ch}(\omega_e, V_d)$  (chamber losses)
  - Ändlig förbränningshastighet  $\sim 2\%$
  - Värmeöverföring  $\sim 15\%$
  - resultat  $\eta_{ig, ch} \approx [0.7, 0.85]$ .
- Optimal tändtidpunkt beror på . . . , momentkurvan på . . .

$$\eta_{ign}(\theta_{ign}) = 1 - C_{ign} \cdot (\theta_{ign} - \theta_{ign, opt}(\omega_e, m_f, \lambda, \dots))^2$$

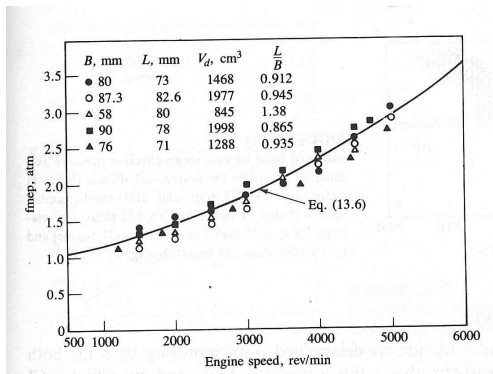
Pumparbete



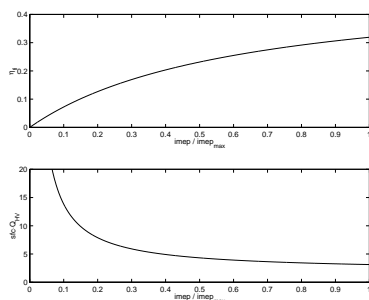
Brutto IMEP (IMEP<sub>g</sub> gross) och netto IMEP.

$$IMEP = IMEP_g - PMEP.$$

Motorfriktion – TFMEP



Lastberoende effektivitet



Ökande last förbättrar effektiviteten.  
Indikerad sfc visas också.

- Mean effective pressure – Medeleffektivt tryck

$$MEP = \frac{\text{Arbete under en cykel}}{\text{Motor Volym}} = \frac{W}{V_d}$$

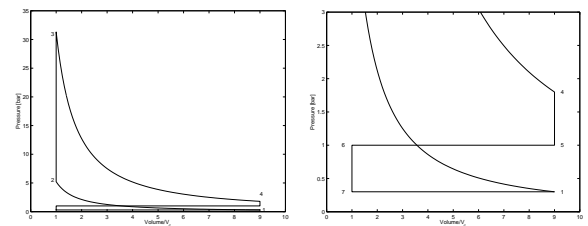
$$W = M 4 \pi$$

enheten Nm/m<sup>3</sup>=N/m<sup>2</sup> vilket är detsamma som tryck.

- xMEP – x anger var man mäter arbetet
- IMEP – Indikerat arbete (cylindertryck)
- FMEP – Friktionsarbete
- BMEP – Bromsat arbete
- PMEP – Pumparbete (cylindertryck)
- Max BMEP för sugmotor = ca 1 MPa (bra att komma ihåg)

Medelvärdesmodell för pumparbete

- Dellast  $p_i = 0.3$  bar and  $p_e = 1$  bar.



- Pumparbete (omsloten area)

$$W_p = (p_e - p_i) V_d = PMEP \cdot V_d$$

Motorfriktion

- Friktionen kan uttryckas i FMEP (friction mean effective pressure)

$$W_f = V_d \cdot FMEP$$

- Heywood polynomial

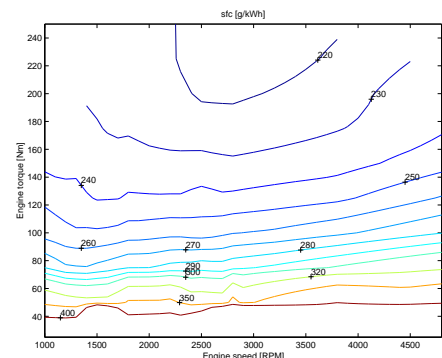
$$FMEP = C_{f0} + C_{f1} N + C_{f2} N^2$$

- ETH model

$$FMEP = \xi_{aux} \cdot [(0.464 + 0.0072 S_p^{1.5}) \cdot \Pi_M \cdot 10^5 + 0.0215 \cdot BMEP] \cdot \left(\frac{0.075}{B}\right)^{0.5}$$

- Finns omfattande MIT modell från (1989) utvidgad (2002).
- Bra att komma ihåg  
 $BMEP \approx 10^6$  Pa  $FMEP \approx 10^5$  Pa

Musseldiagram – “Performance map”



## Maxmomentet – Varvtalsberoende

Effekt och moment som funktion av varvtal.

SAAB-sugmotor

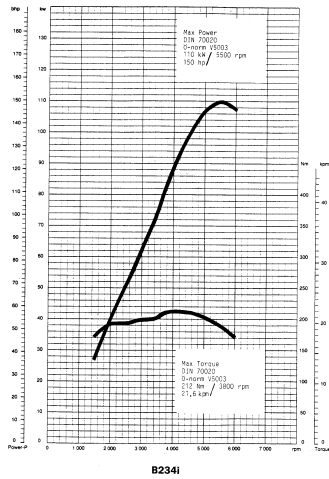
$$P = w * M$$

enhetsbyte

$$P = 2 * \pi * N * M$$

Medelkolvhastighet:

$$S_p = \bar{S}_p = 2 L N = 4 a N$$



## Innehållsförteckning

Repetition drivlina

Repetition - MVEM

Motor – Knack  
Oktantal & Knack

Motor – Tändningsreglering

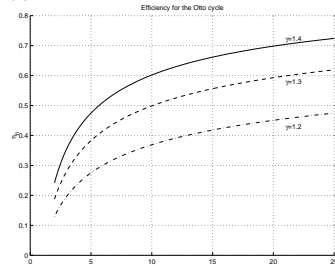
## Ottocykelns effektivitet

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

Normalfall  $\gamma = 1.3$

$\eta_{f,i}$  ökar med  $r_c$  för alla cykler.

Varför designar vi inte för  $r_c = \infty$ ?



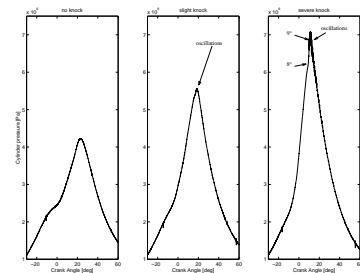
## En annan kolv som upplevt kraftigt knack



–Knack kan förstöra motorn!!!

## Knack – En fundamental begränsning för bensinmotorn

Hur kan man detektera knack?



Knack och oktantal är relaterade.

Oktantal – Bränslets förmåga att "motstå knack".

## Oktantal

- ▶ RON – Research Octane Number  
Europa, Sydafrika, Australien
- ▶ MON – Motor Octane Number  
Motorsport, Högre temperatur och varvtal på motorn.  
8 till 10 enheter lägre än RON.
- ▶  $(RON+MON)/2$  – Används i USA och Kanada  
AKI – Anti Knock Index  
PON – Pump Octane Number
- ▶ RdON – Road Octane Number  
 $RdON = a RON + b MON + c$ , Erfarenhet har visat  
 $a = b = 0.5, c = 0$
- ▶ Fuel sensitivity = RON - MON

## RON & MON

### Arbetspunkter för ON bestämning

	Research	Motor
Engine speed	600 rpm	900 rpm
Ignition timing	13° BTDC	19 – 26° BTDC
Inlet temperature	52°C (125°F)	149°C (300°F)
Inlet pressure		1 atm
Humidity	0.0036-0.0072 kg/kg dry air	
Coolant temperature	100°C	
Air to fuel ratio	Adjusted for maximum knock	

Hur bestämmer man ON > 100?

Referensbränsle: iso-oktan + blyadditiv,  $T = \frac{T \text{ milliliter } (C_2H_5)_4Pb}{1 \text{ gallon iso-octane}}$

$$ON = 100 + \frac{28.28 T}{1.0 + 0.736 T + (1.0 + 1.472 T - 0.035216 T^2)^{0.5}}$$

## Litet mer om varför kompressionen är begränsad?

Alla cykler visar att högre kompressionstal ger bättre effektivitet, vad är problemet?

- ▶ begränsning på maxtrycket
- ▶ värmeöverföring  $dQ \neq 0$
- ▶ ökade emissioner

En diesel motor har högre kompressionstal än en bensinmotor, och det är ett av skälen till dieselmotorns högre effektivitet.

## Innehållsförteckning

Repetition drivlina

Repetition - MVEM

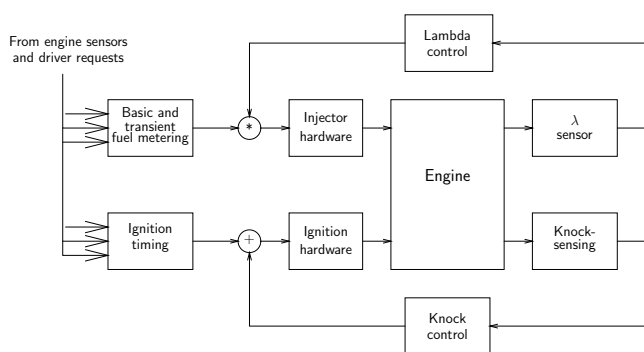
Motor – Knack

Motor – Tändningsreglering

Motor – Moment

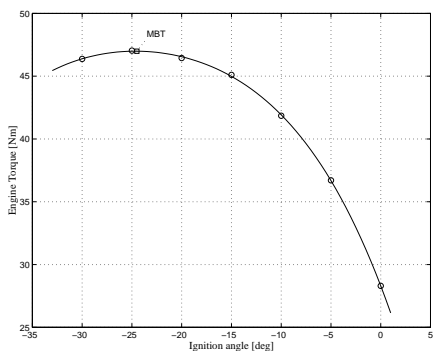
## Tändningsloopen

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

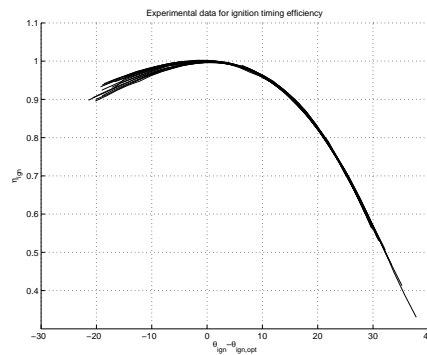


## Bränsleförbrukning

### Moment, Tändningstidpunkt och MBT

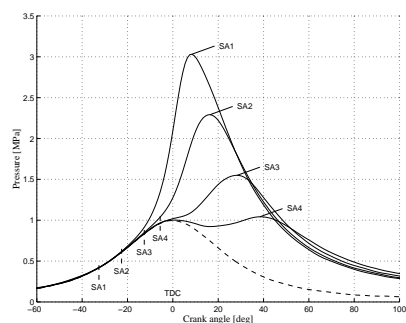


## Tändkrokar – “Ignition Fish Hooks”

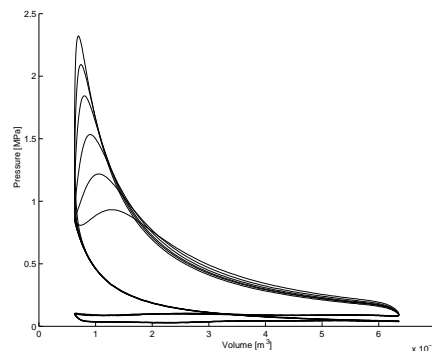


## Tändningstidpunkt ↔ cylindertryck

Positionerar förbränningen relativt kolvrörelsen och styr pV-diagrammet



## Tändningstidpunkt ↔ pV-diagram



## Tändtidpunkt

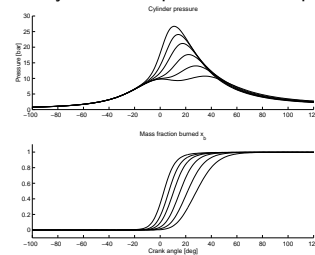
Tändtidpunkten positionerar förbränningen relativt kolvrörelsen  
 PPP - Pressure Peak Position

$$x_b(\theta) = \frac{m_{burned}(\theta)}{m_{total}}$$

Mass fraction burned  
**MBT**

## Tändningstidpunkt ↔ Cylindertryck och MFB

Sex cylindertryck i arbetspunkten 2000 rpm 50 Nm.

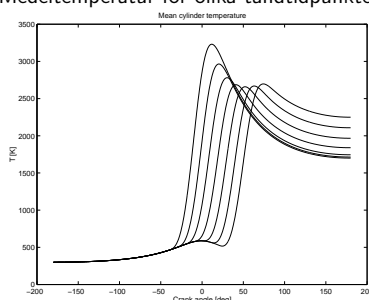


Var finns tändtidpunkten?

Var finns PPP och  $x_b = 0.5$ ?

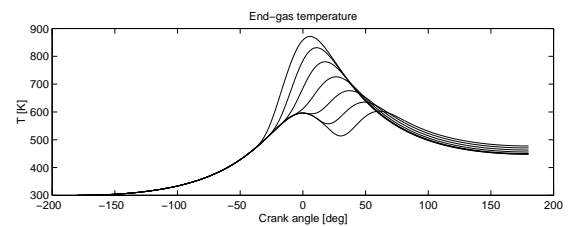
## Tändtidpunktens betydelse för emissionerna

Medeltemperatur för olika tändtidpunkter.



De höga maxtemperaturerna medför att mer  $NO_x$  bildas.

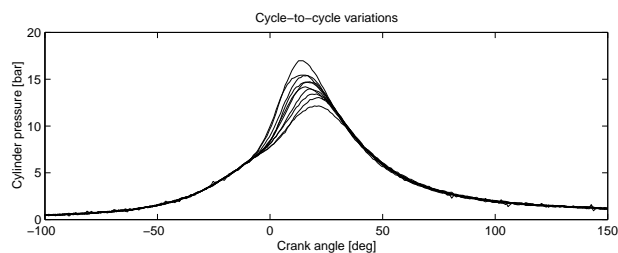
## Knackrisk som funktion av tändtidpunkt



Ändgastemperaturen för olika tändtidpunkter. Senare tändtidpunkt ger lägre temperaturer.  
 Knackreglering

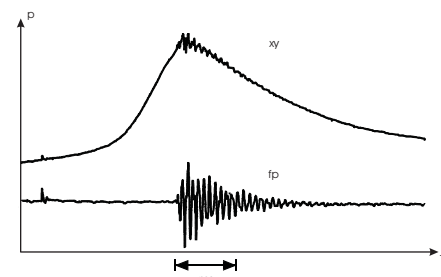
## Cykel till cykel variationer

Alla styrvariabler konstanta, lambda reglering urkopplad.  
 10 konsekutiva cykler



## Knackdetektering

Bandpassfiltrera signalen – Likrikta (eller kvadrera) – Integrera



## Knackreglering

Knackreglering kompenserar för inverkan av parametervariationer.

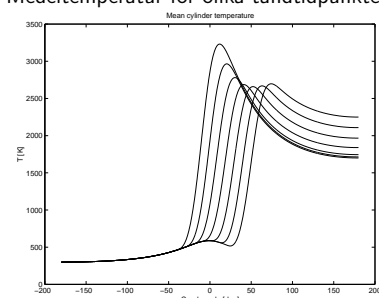
- ▶ Omgivningstemperatur
- ▶ Omgivningstryck vid olika höjder
- ▶ Oktantal för olika bränslen
- ▶ Motorernas tillverkningstolerans och åldring

Kompressionsförhållandet kan ökas med 1 enhet.

Bränsleförbrukningen reduceras med omkring 7%. För turboladdade motorer är vinsterna större.

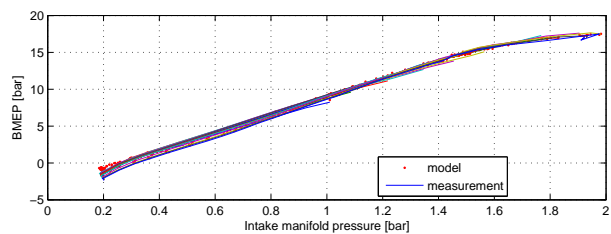
## Tändtidpunktens betydelse för emissionerna

Medeltemperatur för olika tändtidpunkter.



De höga maxtemperaturerna medför att mer  $NO_x$  bildas.

## Motormoment och insugstryck



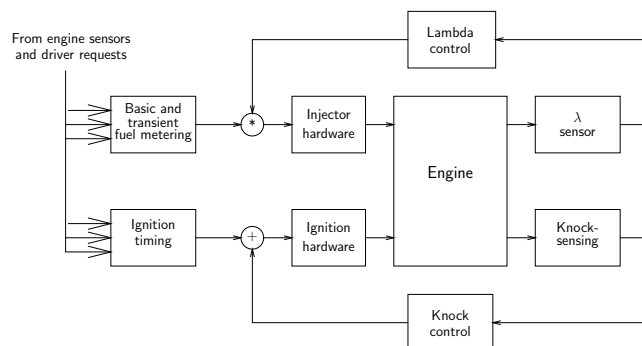
Korrelation, som motiverar varför insugstrycket används som synonym för last.

Vid höga laster:

–Kompromissar på tändningen för att skydda motorn mot knack.

## Huvudlooparna – Tändning

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



## Innehållsförteckning

Repetition drivlina

Repetition - MVEM

Reglering – Huvudlooparna

Motor – Arbetsprinciper

Repetition: Momentmodellen

Motor – Knack

Oktantal & Knack

Motor – Tändningsreglering

Motor – Moment