

TSFS05 – Fordonssystem – Fö 5

Principer och modellering för motormoment, emissioner, och körcykler

Lars Eriksson - Kursansvarig

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

September 9, 2011

Repetition

- MVEM
- Reglering
- Cykelmodellering
- Sammanfattning av termodynamiken
- Termodynamiska system, processer, och cykler

Motor, arbetsprinciper

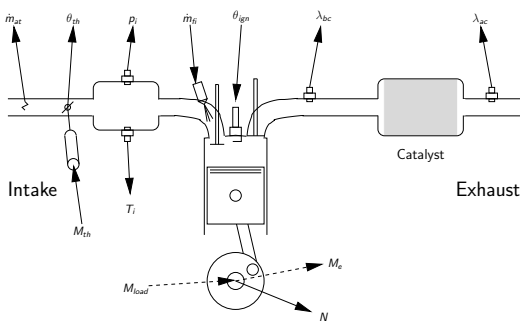
Momentmodellen

Emissioner

Luft och bränsle → Arbete och emissioner

Medelvärdesmodellering

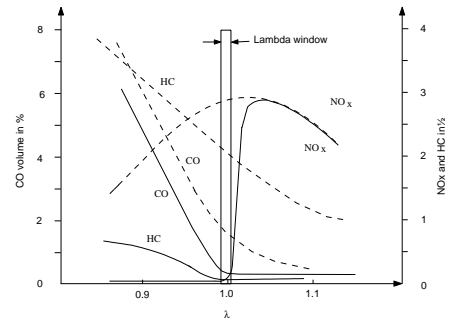
Samband mellan aktuator och sensorer samt sensorer inbördes.



Trevägskatalysatorn och lambdafönstret

streckad - före katalysatorn

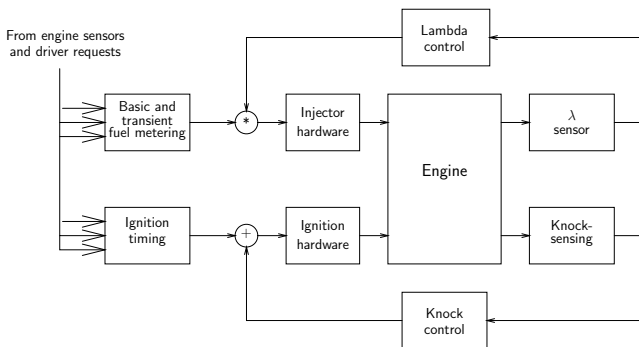
heldragen - efter katalysatorn



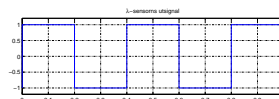
⇒ Reglermål $\lambda = 1$

Huvudlooparna

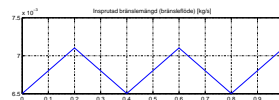
Viktigaste reglerlooparna för bensinmotorer. Den översta är *lambda-regulatorn* och den nedersta är *tändningsregulatorn*.



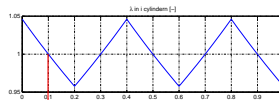
Analys av återkopplingsloop



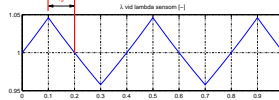
$\lambda_{sond}(t)$



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



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



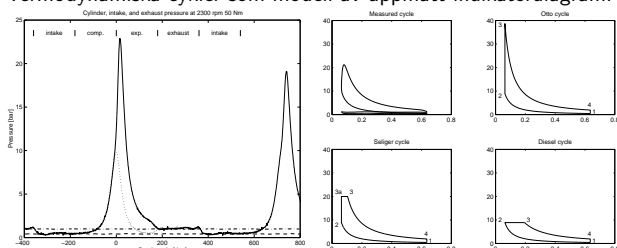
$\lambda_{avg} = \lambda_{motor}(t - \tau_d)$

Självsvängningstid $T = 4\tau_d$

Indikatordiagram

Cylindertryck som funktion av vevaxelvinkel θ .

Termodynamiska cykler som modell av uppmätt indikatordiagram.



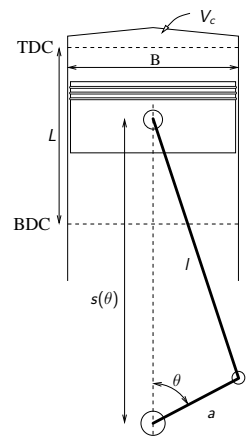
Motorgeometri ⇒ Volym

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

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

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

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



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	$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$	$\gamma \in [1.2, 1.4]$

- ▶ 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.

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)

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

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

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

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

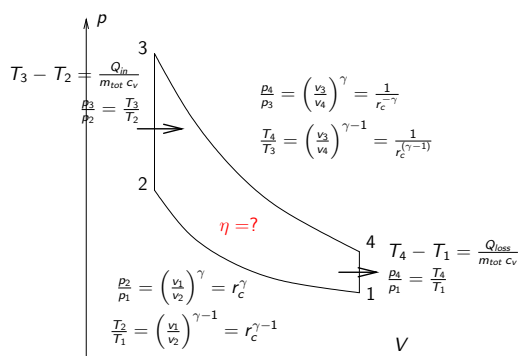
$$Q_{in} = \min(\lambda, 1) \cdot m_f \cdot q_{LHV}$$

- ▶ Integrera 1:a huvudsatsen

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

Cykelräkning – p_1 och T_1 givna

Termodynamiken ger systematisk metod för att räkna runt cykeln



Innehållsförteckning

Repetition

Motor, arbetsprinciper

Momentmodellen

- De ideala cyklernas effektivitet
- Knack – En begränsning
- Indikerat bruttomoment
- Medeffektivt tryck – MEP
- Pumparbete
- Motorfriktion

Emissioner

Ideala Ottocykelns effektivitet

- ▶ Verkningsgrad $\eta_{otto} = \frac{\text{Arbete ut}}{\text{Tillförd energi}}$
- ▶ Känner "tillförd energi" Q_{in}
- ▶ Två sätt att beräkna "arbete ut" W_{out}
 - Integrera arean $W_{out} = \oint p dV$
 - Lösa två integraler $\int c \cdot V^{-\gamma} dV$
 - Första lagen: efter en cykel har U inte ändrats

$$dQ = dU + dW \Rightarrow \Delta Q = \Delta W$$

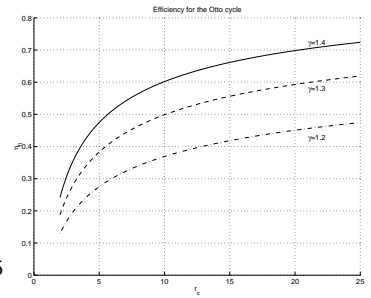
$$\Delta W = W_{out} \quad \Delta Q = Q_{in} - Q_{loss}$$

$$\eta_{otto} = \frac{W_{out}}{Q_{in}} = \frac{Q_{in} - Q_{loss}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{loss}}{Q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}}$$

Ottocykelns effektivitet

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

Normalfall $\gamma = 1.3$



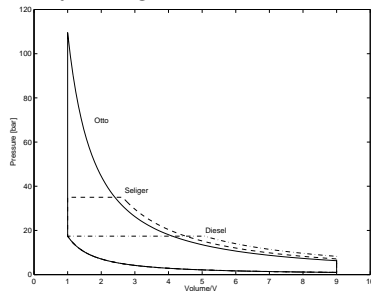
Jämför $r_c = 10$ med $r_c = 5$ i ett pV-diagram. Var förlorar man?

Cykeffektiviteten och pV-diagramet

$$\eta_{f,i} = \frac{W_f}{Q_{in}}$$

Förutsättning:
Samma Q_{in} .

Vad syns i diagrammet?



Några kolvar som utsatts för knock



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

Cykeffektivitet forts.

Dieselrykel eller cykel med konstant-tryck

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

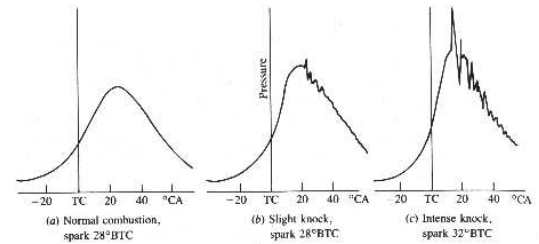
Seiligercykel eller cykel med begränsat-tryck

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

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

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

Knack – En begränsning för bensinmotorer



- Knack kan förstöra motorn!
- Mer om det nästa period...

Medelvärdesmodell för indikerat bruttoarbete W_{ig}

- ▶ 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

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

- ▶ Skillnad verklig/ideal $\eta_{ig, ch}(\omega_e, V_d)$ (chamber losses)
 - Ändlig förbränningshastighet $\sim 2\%$
 - Värmeöverföring $\sim 15\%$
 - resultat $\eta_{ig, ch} \approx [0.8, 0.85]$.
- ▶ Optimal tändtidpunkt beror på ... , momentkurvan på ...

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

MEP – Ett viktigt begrepp

- ▶ Mean effective pressure – Medeleffektivt tryck

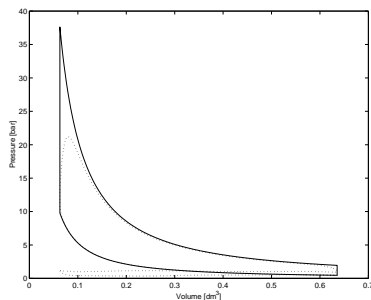
$$MEP = \frac{\text{Arbete under en cykel}}{\text{Motor Volym}} = \frac{W}{V_d}$$

$$W = M 4 \pi$$

enheten $Nm/m^3 = N/m^2$ 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)

Pumparbete – sista enkla åtgärden

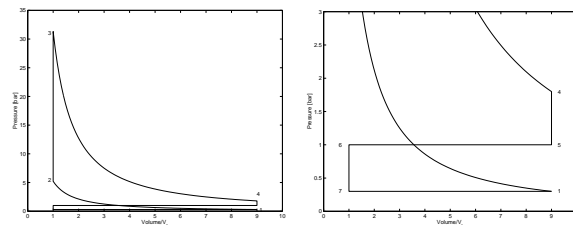


Brutto IMEP (IMEP_g gross) och netto IMEP.

$$\text{IMEP} = \text{IMEP}_g - \text{PMEP}$$

Medelvärdesmodell för pumparbete

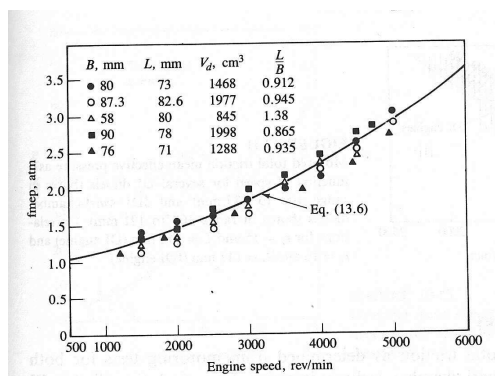
▶ Dellast $p_i = 0.3 \text{ bar}$ and $p_e = 1 \text{ bar}$.



▶ Pumparbete (omsloten area)

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

Motorfriktion – TFMEP



Motorfriktion

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

$$W_f = V_d \cdot \text{FMEP}$$

▶ Heywood polynomial

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

▶ ETH model

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

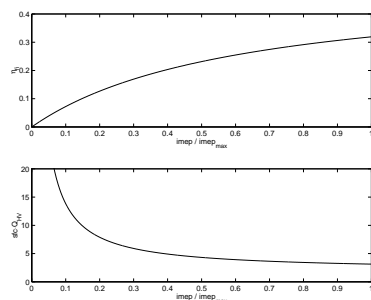
▶ Finns omfattande MIT modell från (1989) utvidgad (2002).

▶ Bra att komma ihåg

$$\text{max BMEP} \approx 10^6 \text{ Pa}$$

$$\text{FMEP} \approx 10^5 \text{ Pa}$$

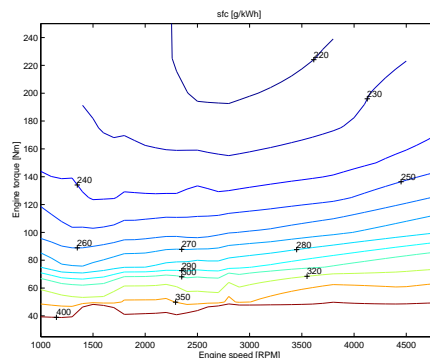
Lastberoende effektivitet



Ökande last förbättrar effektiviteten.

Indikerad sfc visas också.

Musseldiagram – “Performance map”



Innehållsförteckning

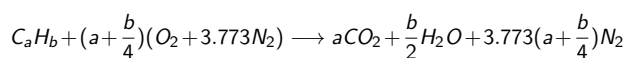
Repetition

Motor, arbetsprinciper

Momentmodellen

Emissioner

Emissioner



▶ Vatten, koldioxid och kväve räknas inte som emissioner.

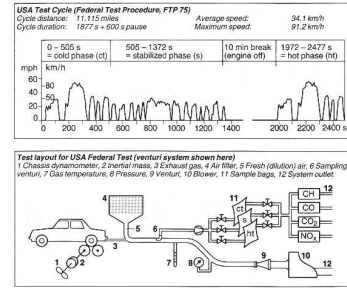
▶ Minskning av koldioxidutsläpp kräver

- ▶ minskad bränsleförbrukning
- ▶ byter bränsle t.ex. mot metan CH₄ eller bibränslen
- ▶ samlar in avgaser...

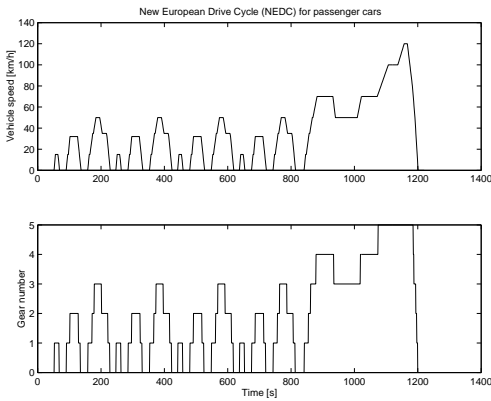
▶ Bildas även NO, NO₂, CO, och oförbrända kolväten HC. NO_x samlingsnamn på NO, NO₂, ...

Komb. m. SHED (Sealed Housing for Evaporative Determination).

- ▶ Internationellt enhetliga procedurer för uppsamling av avgaser och mätningar.
- ▶ Hel bil i chassi-dynamometer (Jfr Bilprovning)
- ▶ Olika körcykler i olika länder. Förare håller hastigheten.
- ▶ CVS-metoden – (Constant Volume Sampling)
- ▶ Utspädning 1:10
Fördelar: Slipper kondensering av vattenånga, vilket skulle reducera NO_x . Minskar reaktionstendensen i avgaserna.
Nackdel: Svårare mätning ty lägre koncentration



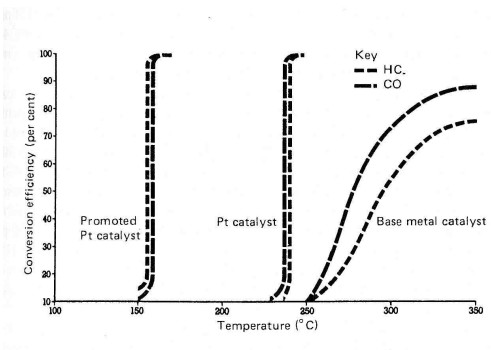
New European Driving Cycle – NEDC (Proj. 1c)



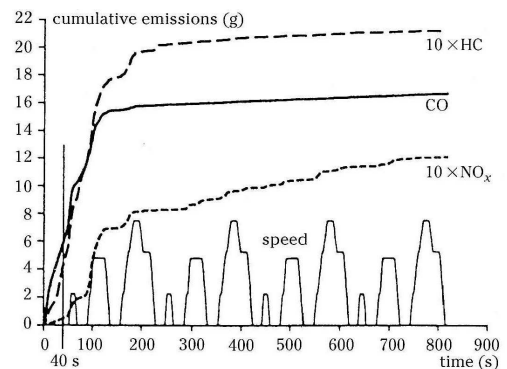
Emissionsgränser, bensindriven personbil, USA (g/mile)

year	CO g/mile	HC g/mile	NO_x g/mile	Metods
1966	87.0	8.800	3.60	Pre control
1970	34.0	4.100	4.00	Retarded ignition, thermal reactors, and exhaust gas recirculation (EGR)
1974	28.0	3.000	3.10	Same as above
1975	15.0	1.500	3.10	Oxidizing catalysts
1977	15.0	1.500	2.00	Ox.cat. and improved EGR
1980	7.0	0.410	2.00	Improved ox.cat. and three way catalysts
1981	7.0	0.410	1.00	Improved threeway catalyst and support material
1983	3.4	0.410	1.00	Continuous improvements
1994	3.4	0.250	0.40	
1996	3.4	0.125	0.40	
2001	3.4	0.075	0.20	

Katalysator effektivitet och temperatur



Emissioner under en europeisk körcykel



Vid start $T \approx 20^\circ C$. \Rightarrow Gaserna efterbehandlas inte.

Enkel medelvärdesmodell: Light-off tid.

Repetition

- MVEM
- Reglering
- Cykelmodellering
- Sammanfattning av termodynamiken
- Termodynamiska system, processer, och cykler

Motor, arbetsprinciper

Momentmodellen

- De ideala cyklernas effektivitet
- Knack – En begränsning
- Indikerat bruttomoment
- Medeffektivt tryck – MEP
- Pumparbete
- Motorfriktion

Emissioner