

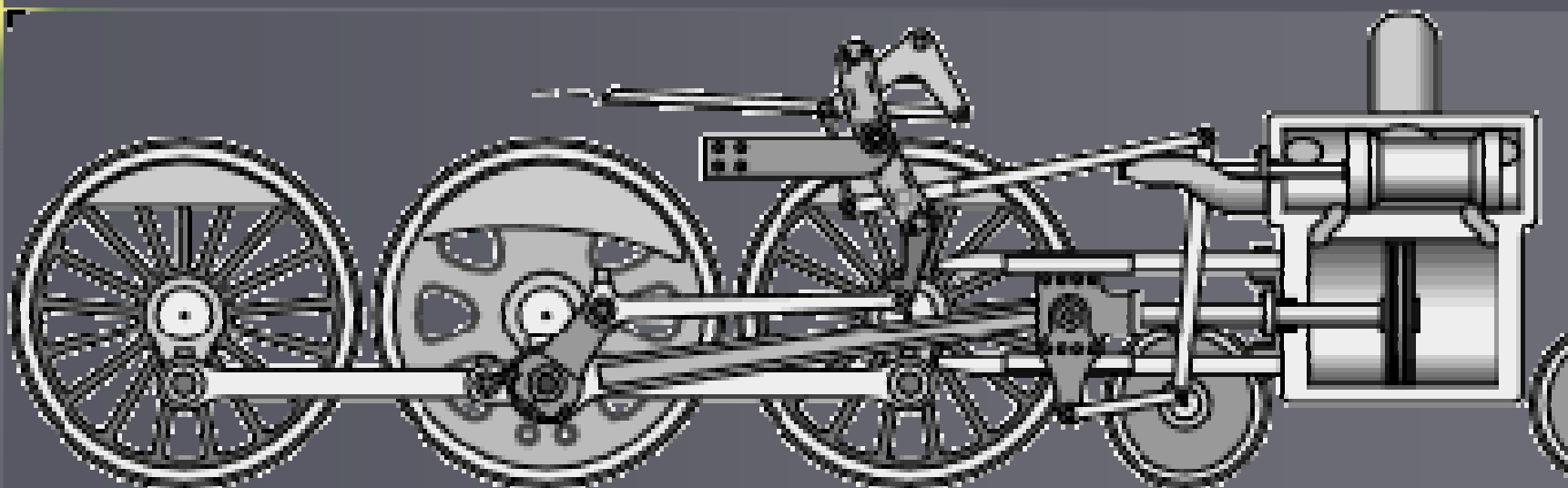
Silniki spalinowe

- Silniki cieplne
- Obieg Carnota
- Obieg Otta
- Obieg Diesla
- Obieg Sabathego
- Obieg Joula
- Obieg Braytona
- Silnik strumieniowy
- Silnik pulsacyjny

w15

Silniki spalinowe

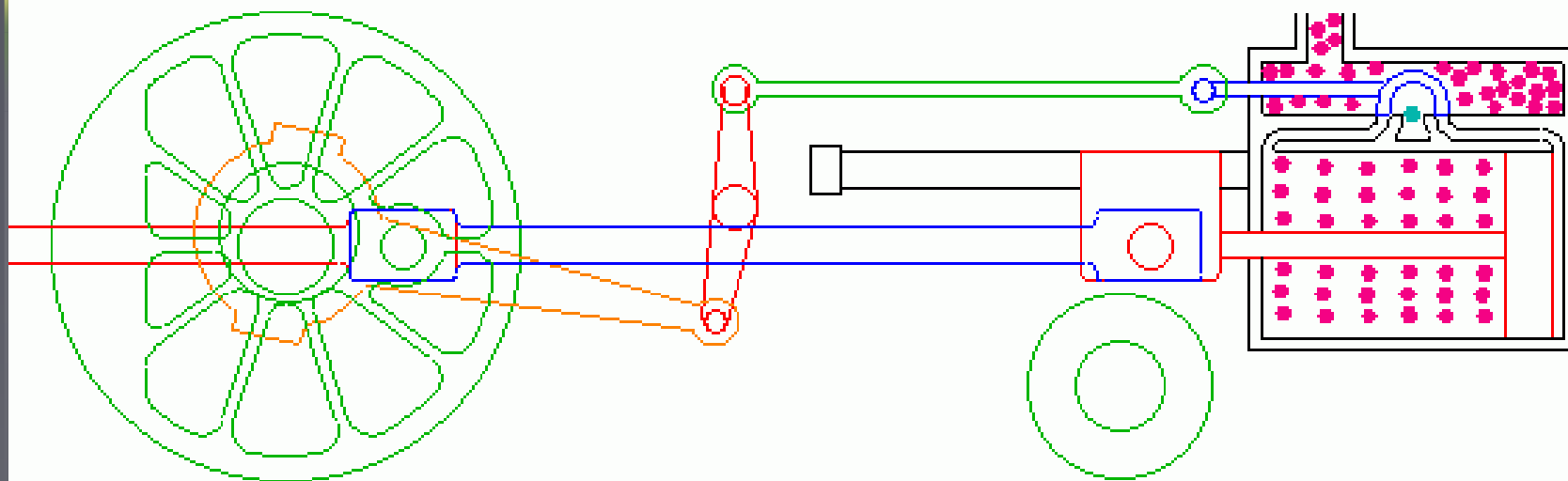
Termodynamika techniczna



w15

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna



Copyright 2000, Kaveney.com

Silniki spalinowe

- Maszyny i urządzenia energetyczne dokonują przemiany jednego rodzaju energii w drugi.
- Silniki cieplne zamieniają ciepło (energię wewnętrzną) na pracę.

Silniki spalinowe

Początkową formą energii w maszynie lub urządzeniu energetycznym może być:

- energia chemiczna
- energia jądrowa
- ciepło (energia wewnętrzna)
- energia ciśnienie czynnika.

Końcową formą energii w maszynie lub urządzeniu energetycznym może być:

- ciepło (energia wewnętrzna)
- praca (energia mechaniczna)
- energia elektryczna (energia prądu elektrycznego).

Silniki spalinowe

Dla źródeł ciepła (grzejnik i chłodnica) o danych temperaturach najwyższą sprawność osiąga silnik pracujący według obiegu Carnota.

w15

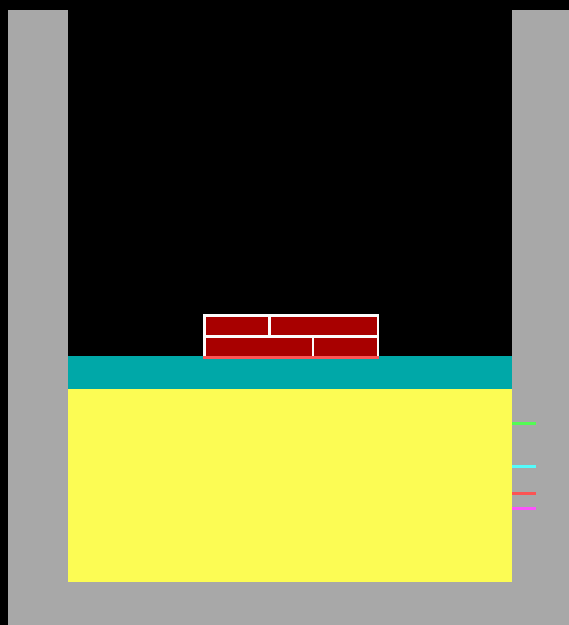
Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna

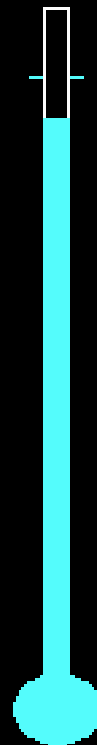
F1 to stop

F3 to restart

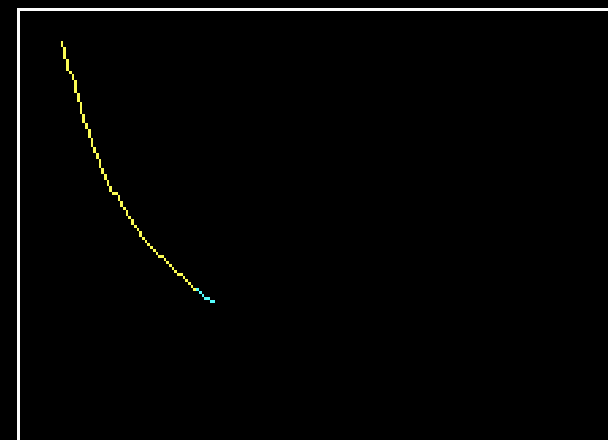
ESC for Menu



ADIABATIC

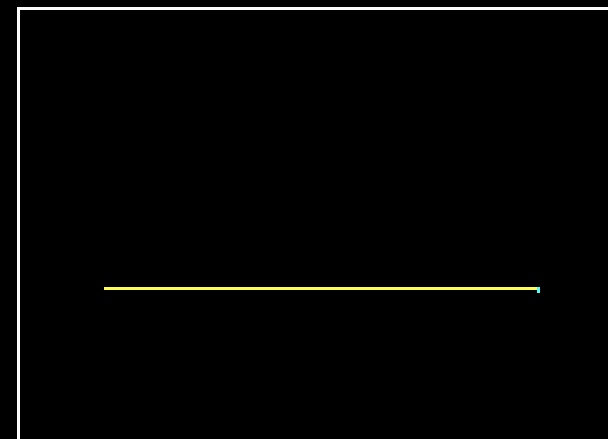


P



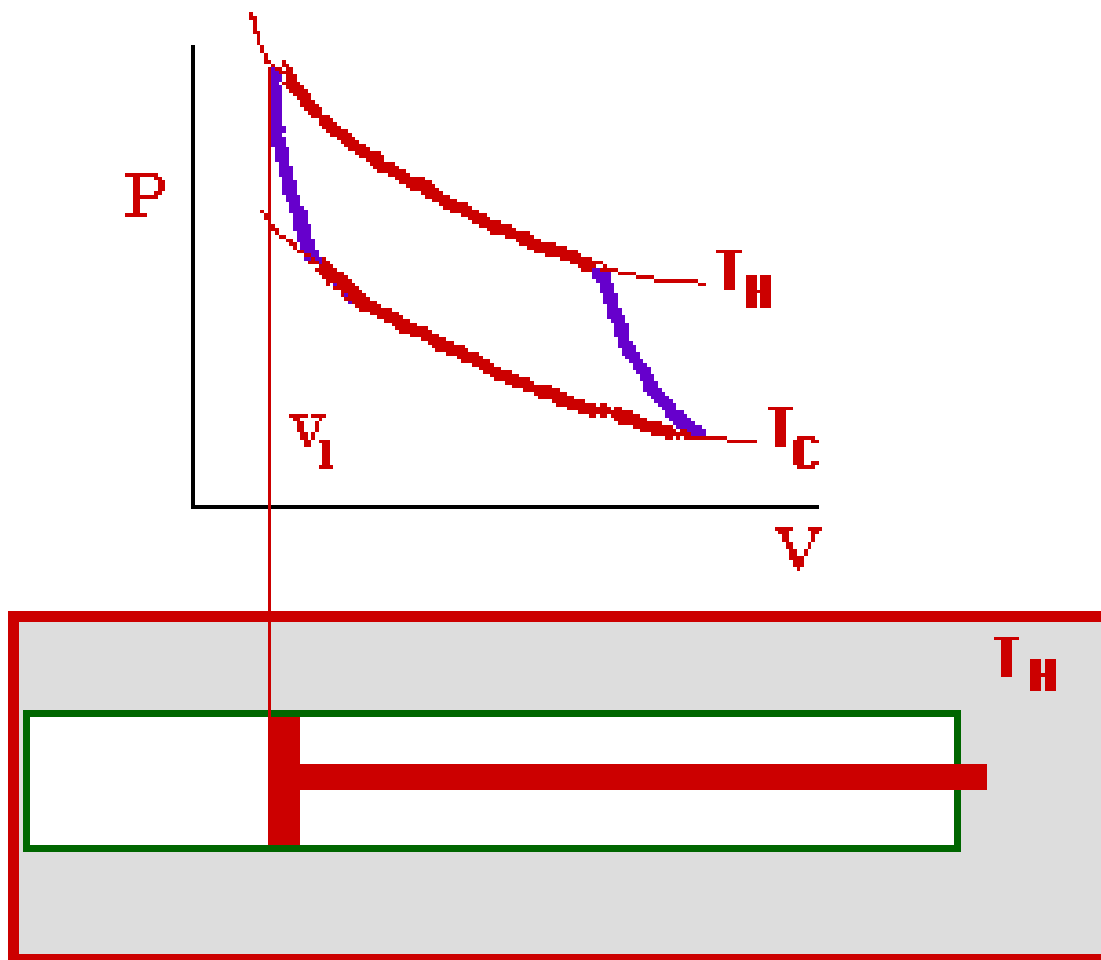
V

T

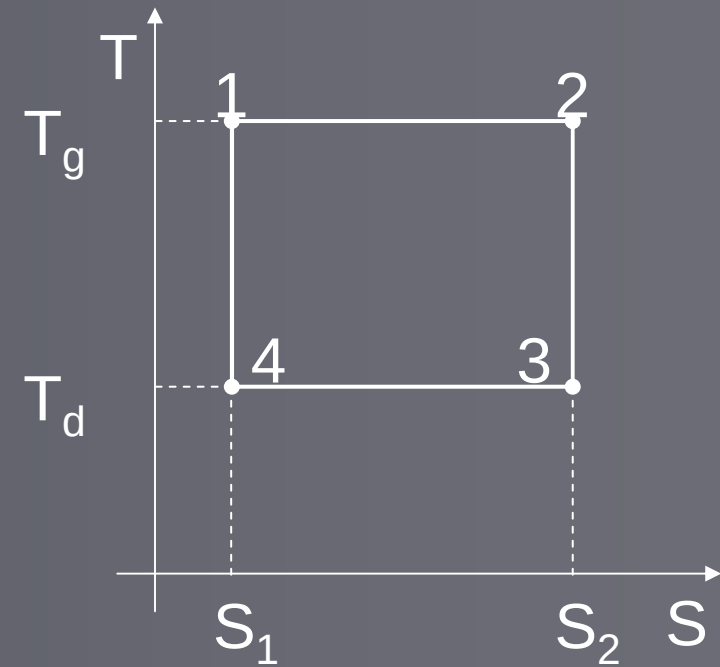
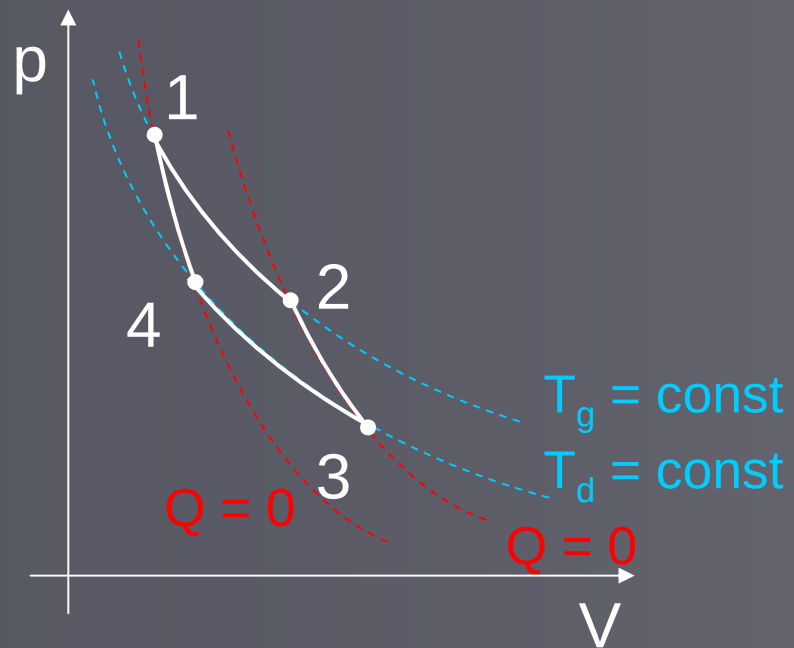


S

Silniki spalinowe



Silniki spalinowe



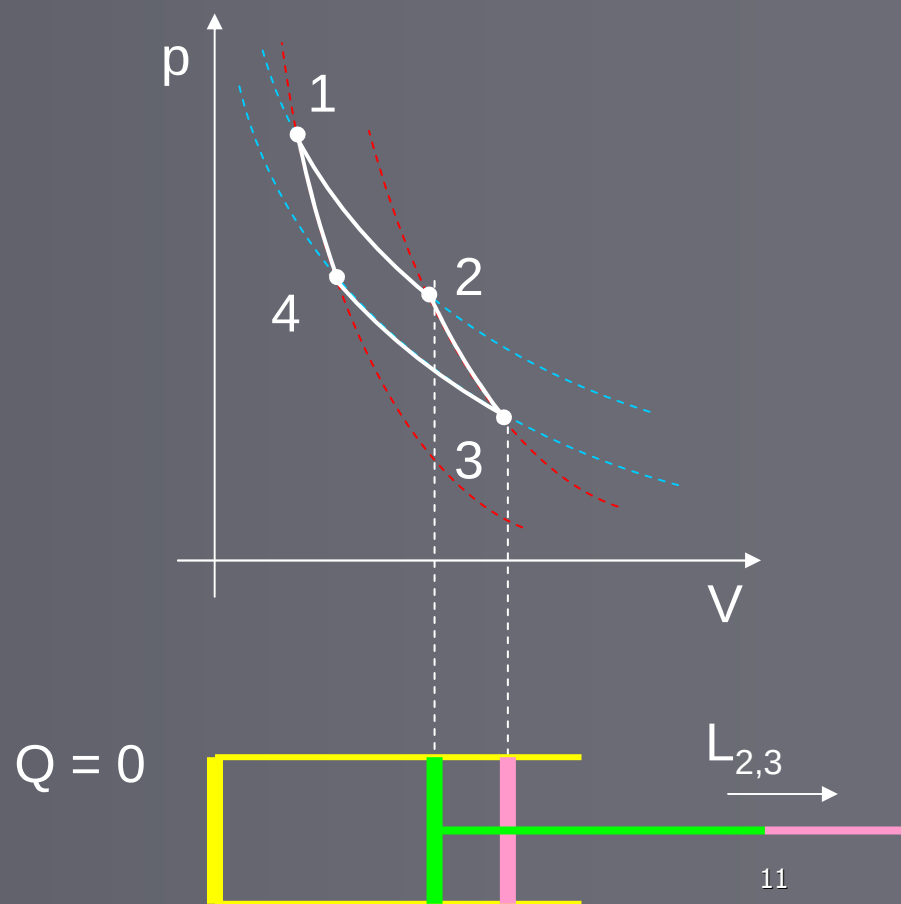
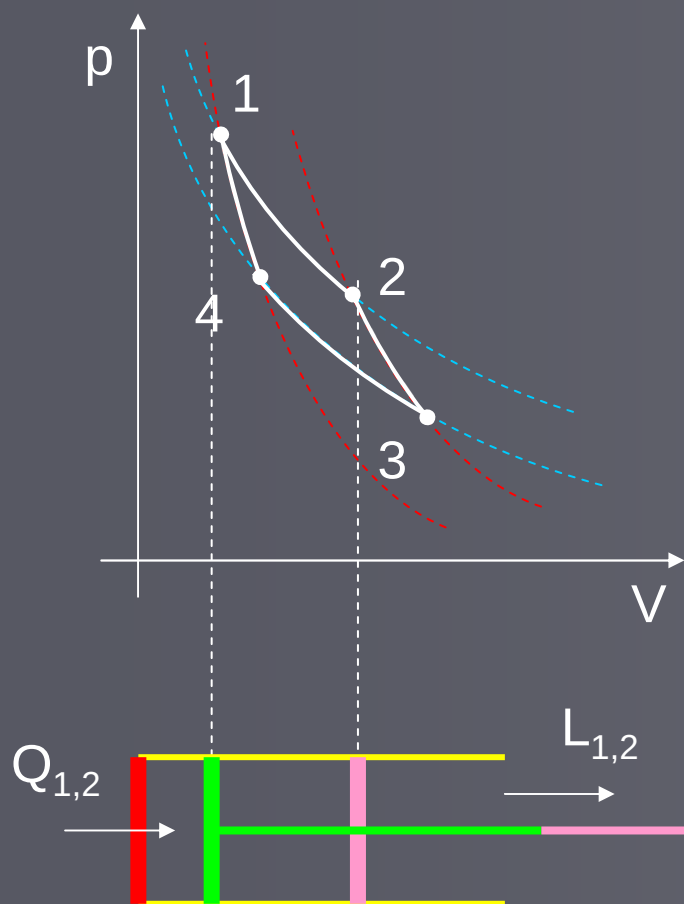
Silniki spalinowe

- 1 – 2 rozprężanie izotermiczne (pobieranie ciepła)
- 2 – 3 rozprężanie adiabatyczne
- 3 – 4 sprężanie izotermiczne (oddawanie ciepła)
- 4 – 1 sprężanie adiabatyczne

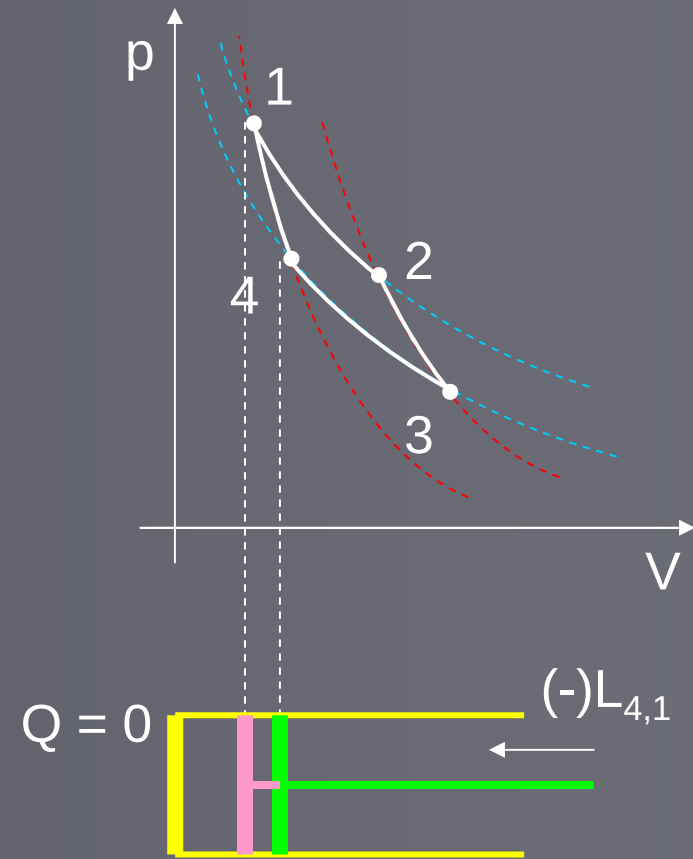
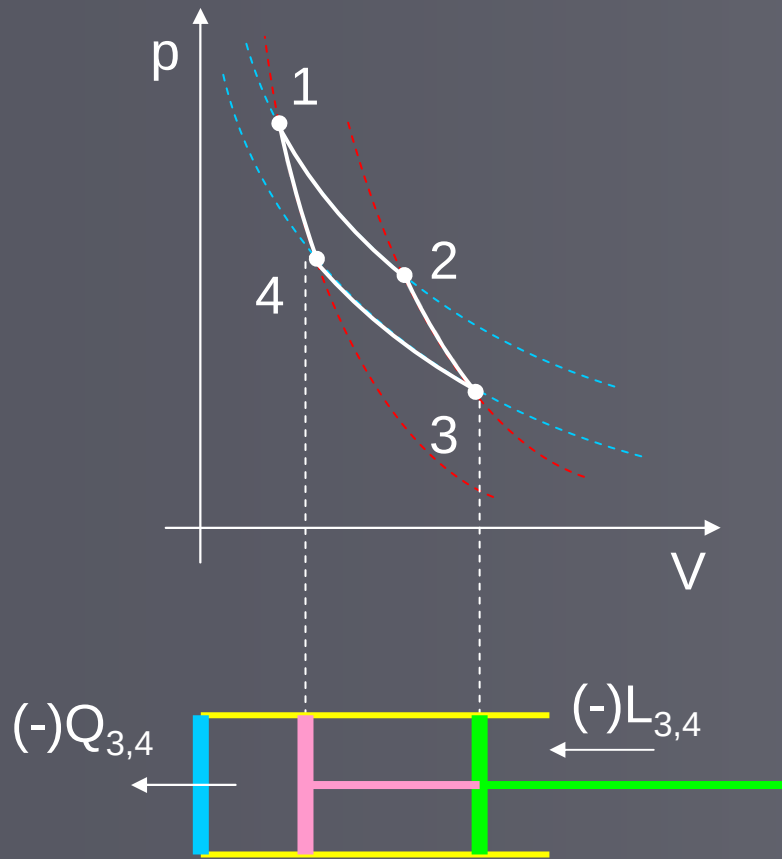
w15

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna



Silniki sppalinowe



Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna

$$Q_{1,2} = 0 + L_{1,2}$$

$$U_1 = U_2$$

$$0 = U_3 - U_2 + L_{3,2}$$

$$(-)Q_{3,4} = 0 + (-)L_{3,4}$$

$$U_3 = U_4$$

$$0 = U_1 - U_4 + (-)L_{4,1}$$

$$Q_{1,2} + (-)Q_{3,4} = L_{1,2} + L_{2,3} + (-)L_{3,4} + (-)L_{4,1}$$

Silniki spalinowe

$$Q_{1,2} = T_g \cdot \Delta S_{1,2} = T_g \cdot (S_2 - S_1)$$

$$Q_{3,4} = T_d \cdot \Delta S_{3,4} = T_d \cdot (S_4 - S_3)$$

Silniki spalinowe

$$\eta = \frac{L_{ob}}{Q_{pob}} = \frac{Q_{1,2} + Q_{3,4}}{Q_{1,2}} = 1 + \frac{Q_{3,4}}{Q_{1,2}}$$

$$\eta = 1 + \frac{T_d \cdot (S_2 - S_1)}{T_g \cdot (S_4 - S_3)} 1 + \frac{T_d \cdot (S_2 - S_1)}{T_g \cdot (S_1 - S_2)}$$

Silniki spalinowe

$$\eta = 1 - \frac{T_d}{T_g}$$

Silniki spalinowe

Rzeczywiste silniki pracują według innych obiegów termodynamicznych, w których zakłada się izobaryczną lub izochoryczną wymianę ciepła. Obieg termodynamiczny, według którego pracuje silnik cieplny jest obiegiem odwracalnym.

Silniki spalinowe

Procesy nieodwracalne zachodzące w silnikach cieplnych zmniejszają sprawność silnika. Straty nieodwracalne dzielimy na:

- straty cieplno-przepływowe
- straty mechaniczne.

Do określenia strat cieplno-przepływowych analogicznie, jak dla sprężarek waporowych, stosujemy pojęcie pracy indykowanej (wewnętrznej) i sprawności indykowanej (wewnętrznej)

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna

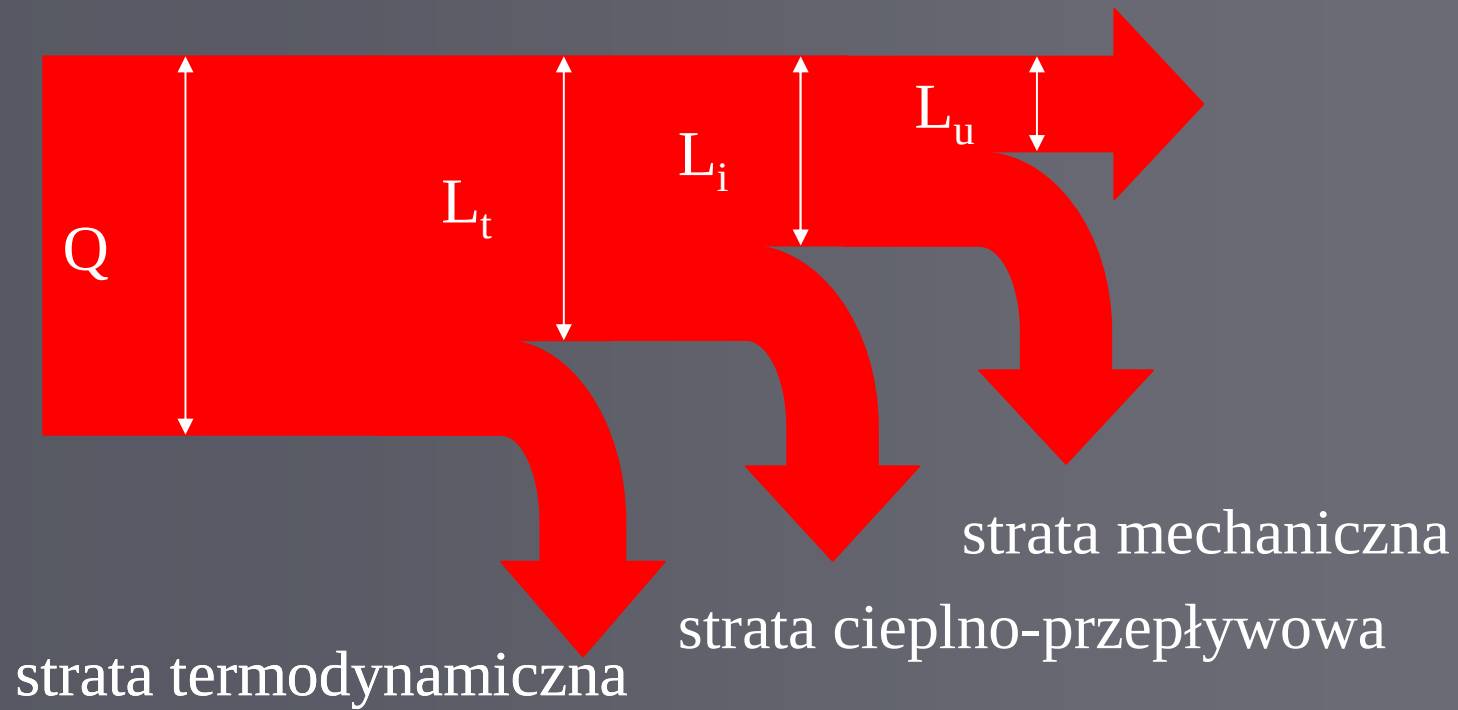
$$\eta_t = \frac{E_t}{E_d} = \frac{L_t}{Q}$$

$$\eta_t = \frac{E_w}{E_t} = \frac{L_i}{L_t}$$

$$\eta_t = \frac{E_u}{E_w} = \frac{L_u}{L_i}$$

$$\eta_u = \eta_t \cdot \eta_i \cdot \eta_m$$

Silniki spalinowe



Silniki spalinowe

- Silniki spalinowe są silnikami cieplnymi o spalaniu wewnętrznym.
- Czynnikiem termodynamicznym, na jakim pracują silniki spalinowe są spaliny.
- W silnikach spalinowych możliwe jest spalanie paliw ciekłych gazowych będących węglowodorami lub alkoholami.
- Spaliny są mieszaniną gazów dwuatomowych (N_2) i trzyatomowych (CO_2 , H_2O).

Silniki spalinowe

Silnikami spalinowymi są:

- silniki wyporowe:
 - silniki tłokowe ZI
 - silniki tłokowe ZS
- silniki przepływowe (przelotowe):
 - silniki sprężarkowe:
 - silniki turbodrzutowe
 - silniki bezsprężarkowe:
 - silniki strumieniowe
 - silniki pulsacyjne.

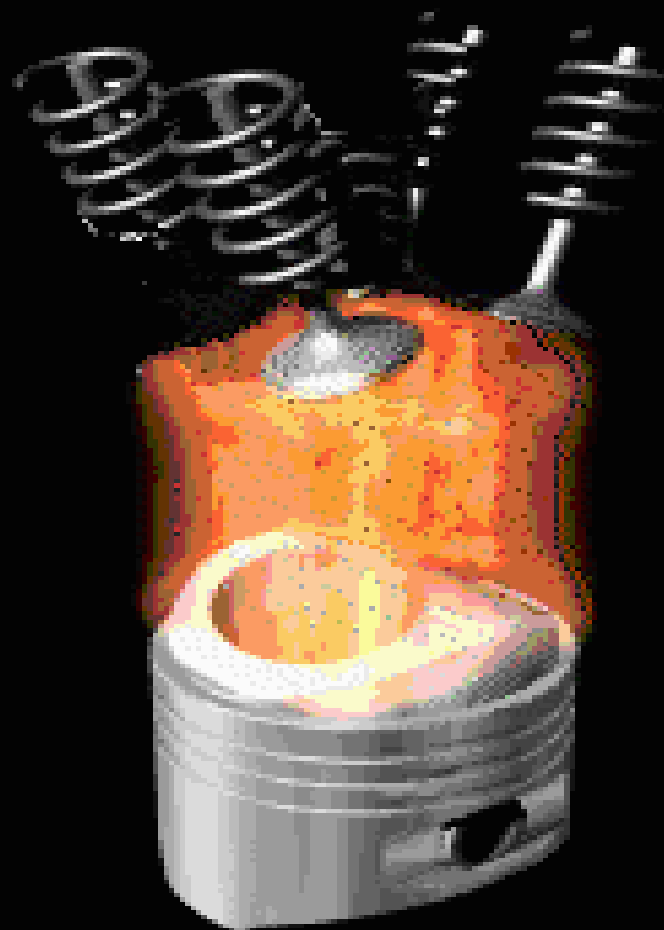
Silniki spalinowe

- Jedynym działającym wyporowym silnikiem rotacyjnym jest silnik Wankla.
- Teoretyczny przebieg pracy silnika Wankla jest taki sam, jak dla tłokowego silnika spalinowego ZI.

w15

Silniki spalinowe

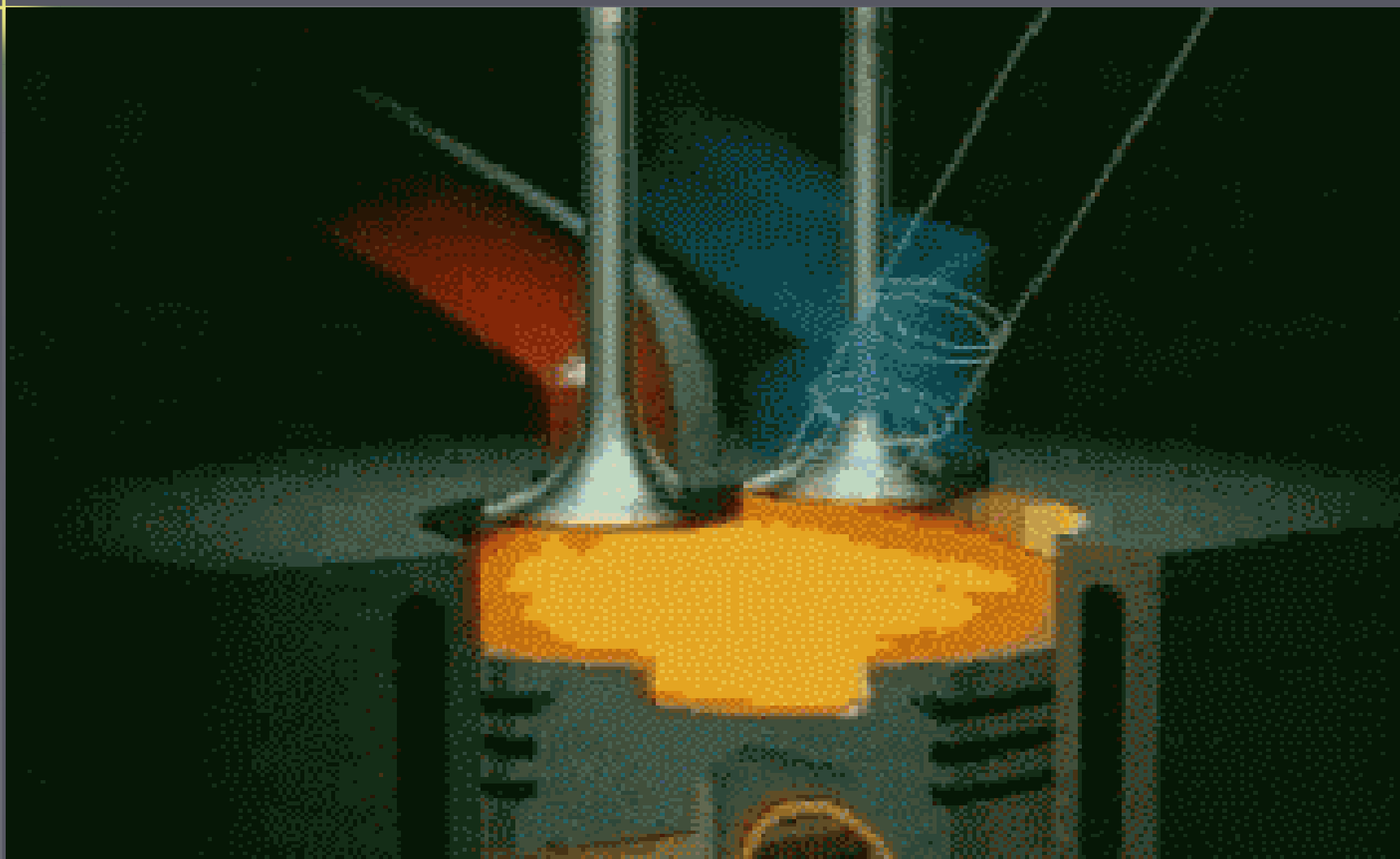
Termodynamika techniczna



w15

Silniki spalinowe

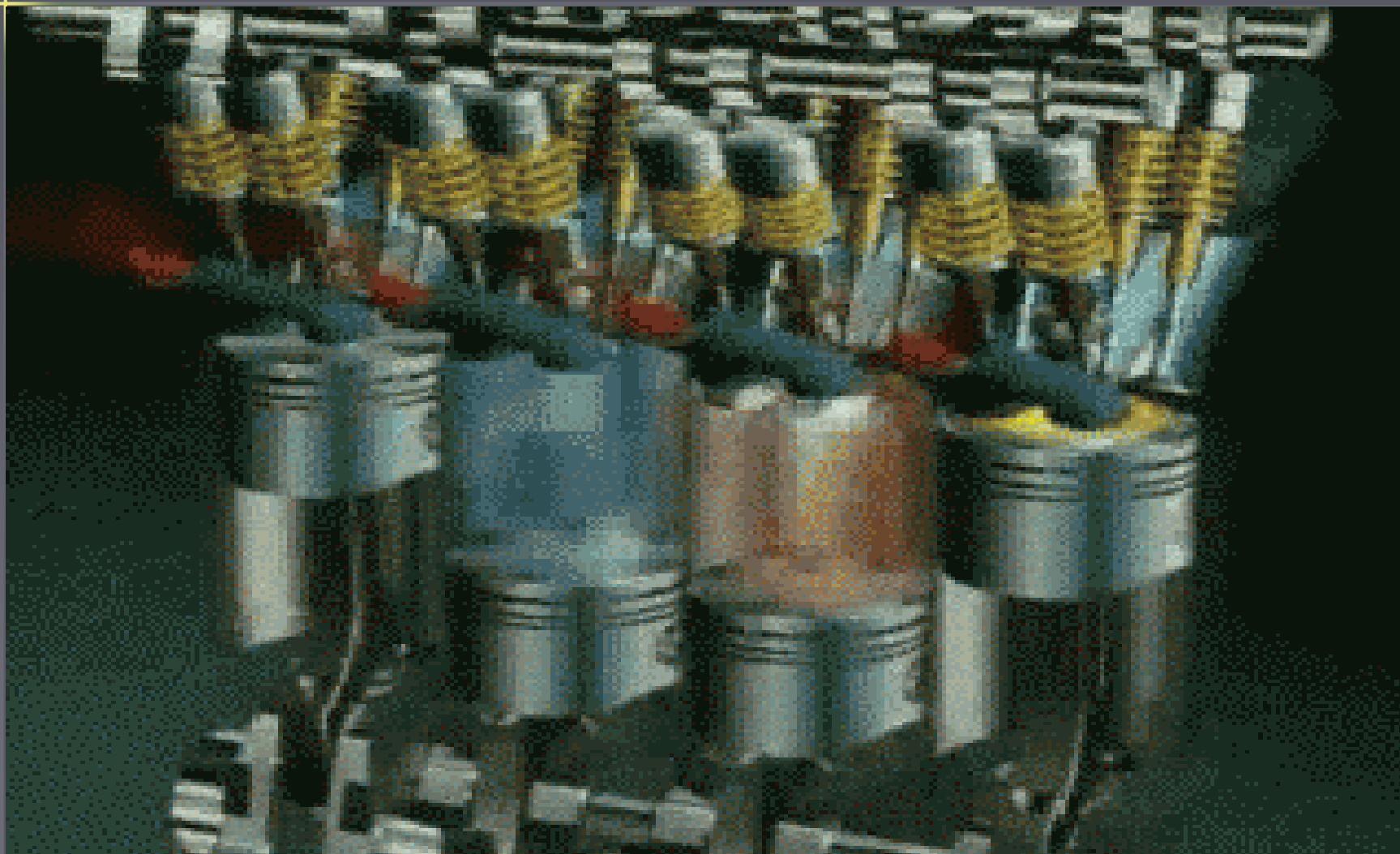
Termodynamika techniczna



w15

Silniki spalinowe

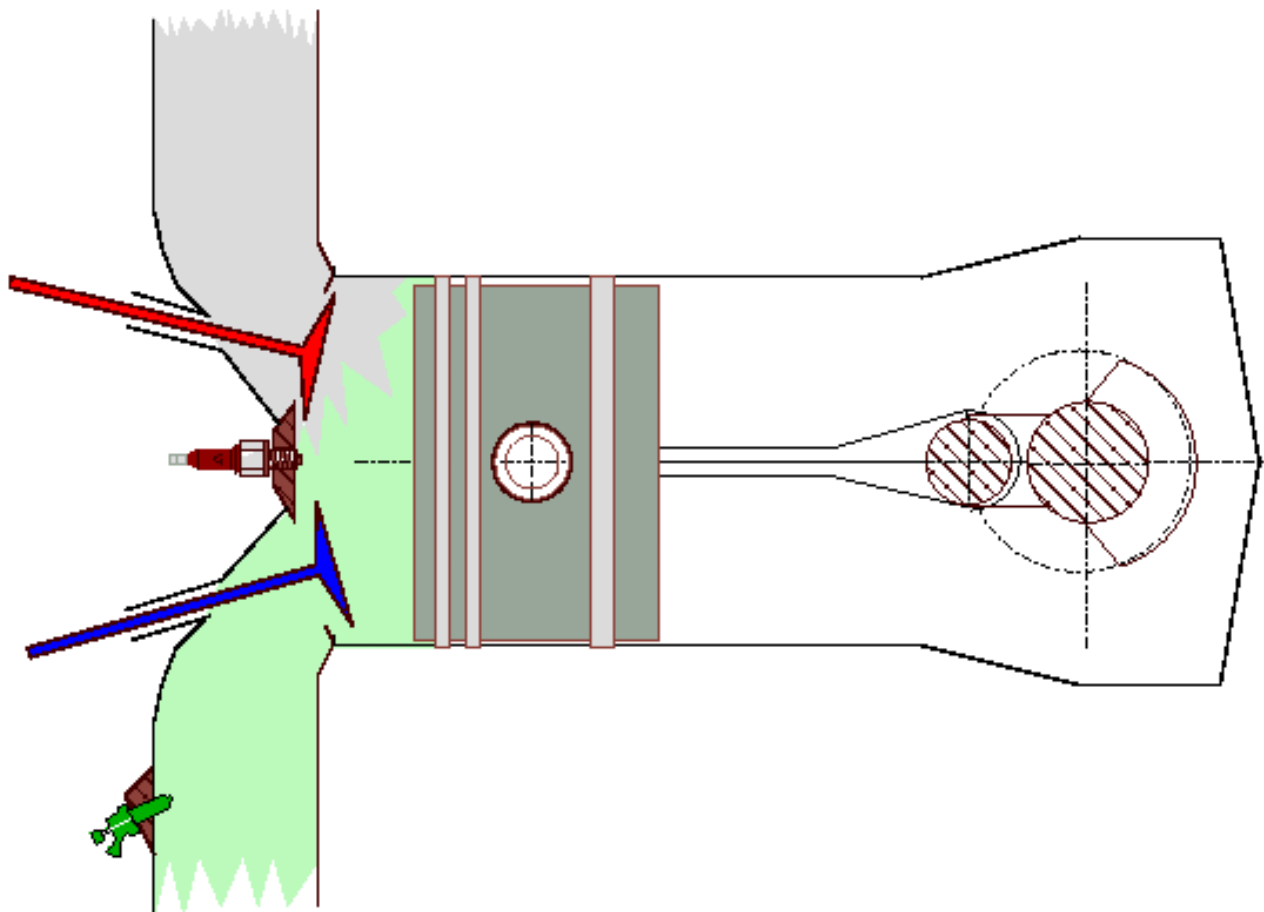
Termodynamika techniczna



Silniki spalinowe

- W silniku ZI mieszanka paliwowo-powietrzna zapalana jest iskrą elektryczną.
- Uwzględniając czas spalania mieszanki paliwowo-powietrznej i ruch, jaki tłok w tym czasie wykonuje, przyjmujemy izochoryczny przebieg spalania.
- Otwarcie zaworu wydechowego w DZP wywołuje gwałtowny spadek ciśnienia gazu w cylindrze.
- Spadek ciśnienia po otwarciu zaworu wydechowego w teoretycznym przebiegu pracy silnika ZI interpretujemy jako izochoryczne oddanie ciepła.

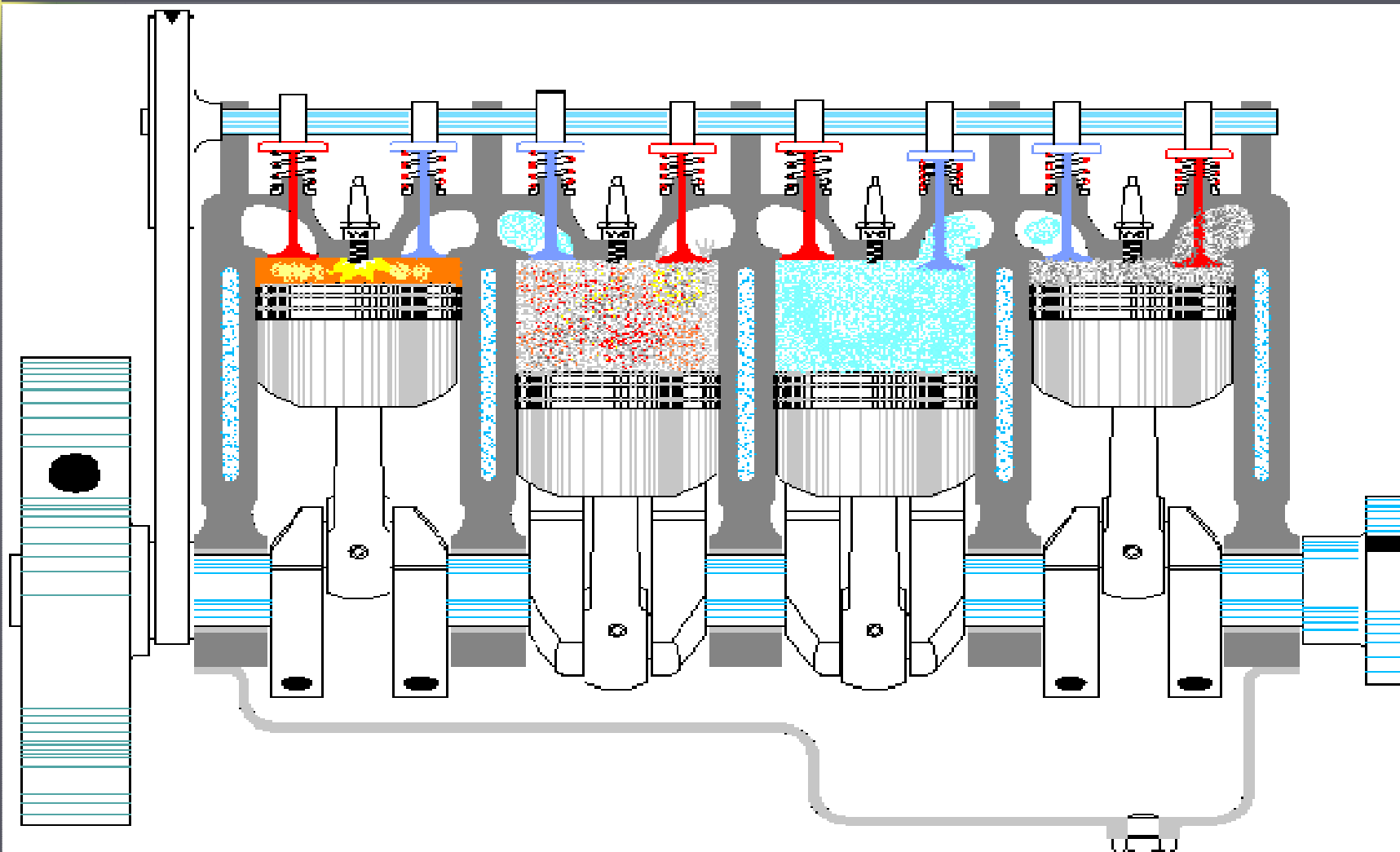
Silniki spalinowe



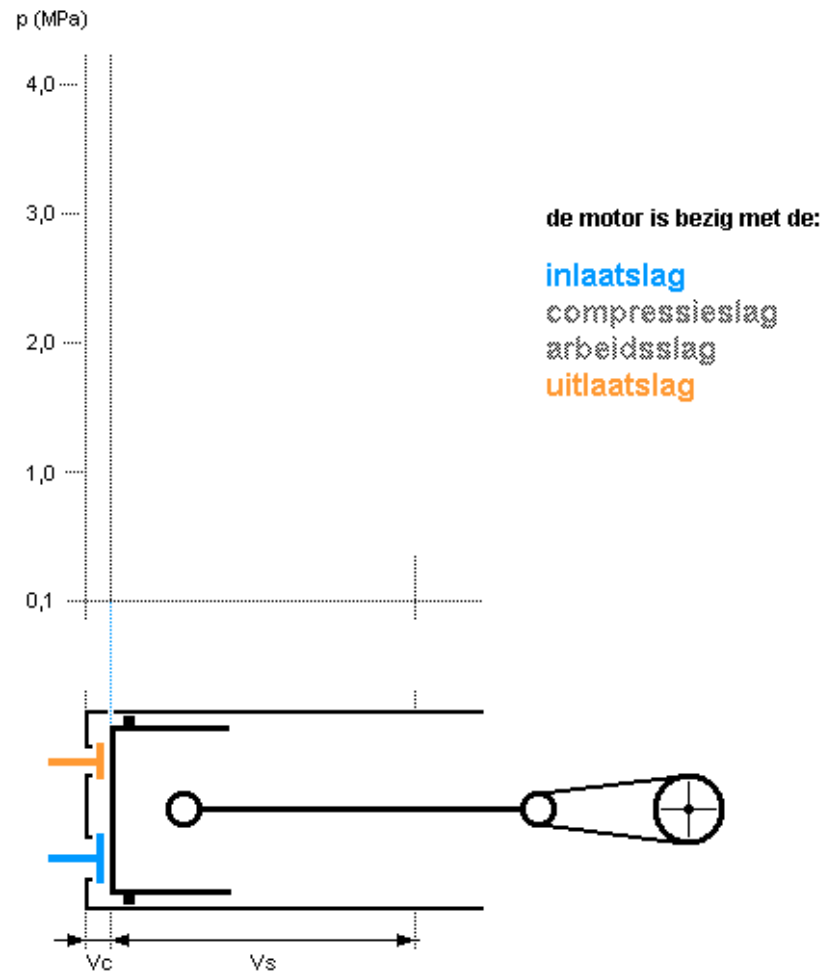
w15

Silniki spalinowe

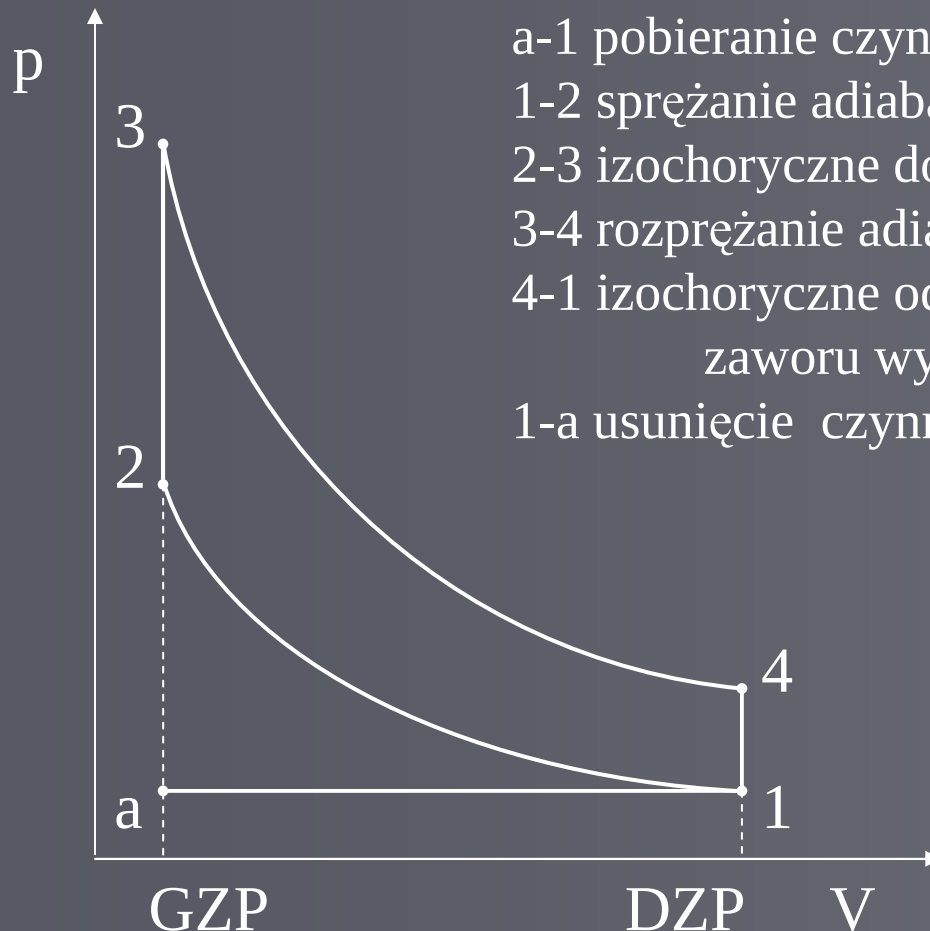
Termodynamika techniczna



Silniki spalinowe



Silniki spalinowe



- a-1 pobieranie czynnika (suw ssania)
- 1-2 sprężanie adiabatyczne (suw sprężania)
- 2-3 izochoryczne dostarczenie ciepła (spalanie)
- 3-4 rozprężanie adiabatyczne (suw pracy)
- 4-1 izochoryczne oddanie ciepła (otworzenie zaworu wydechowego)
- 1-a usunięcie czynnika (suw wydechu)

w15

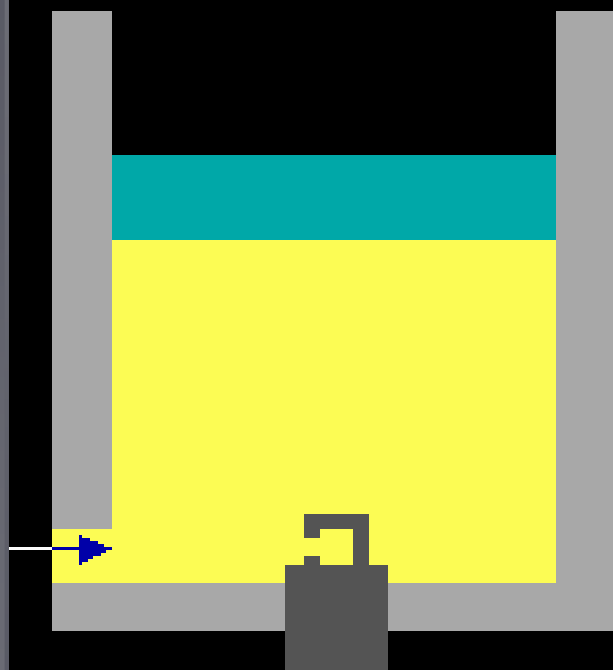
Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna

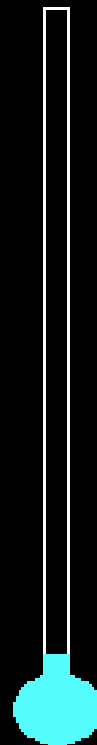
F1 to stop

F3 to restart

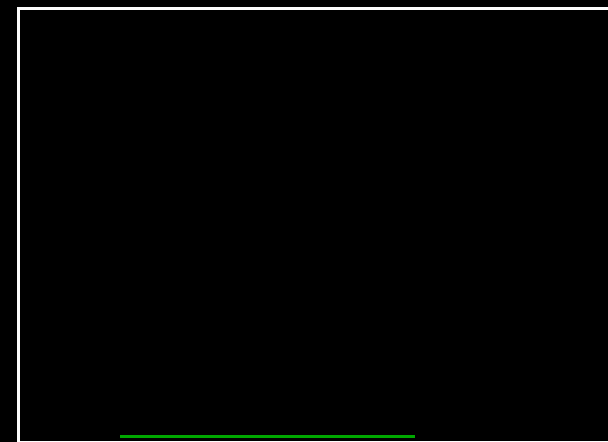
ESC for Menu



FUEL INTAKE

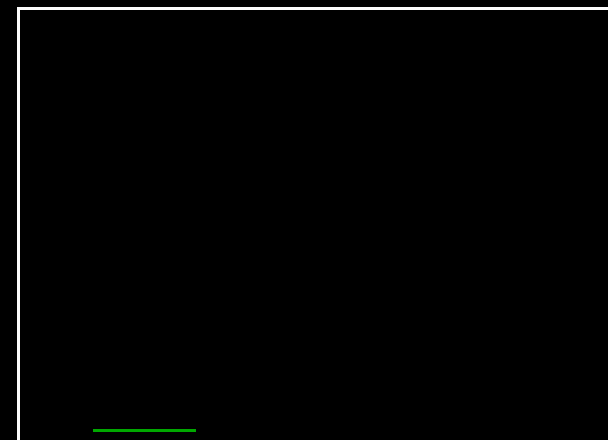


P



V

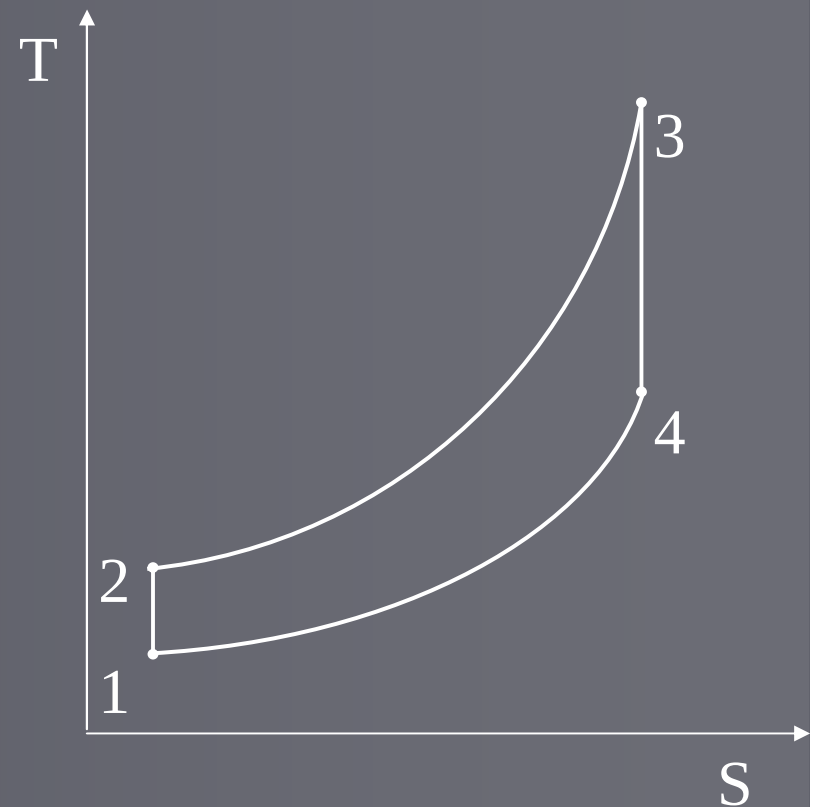
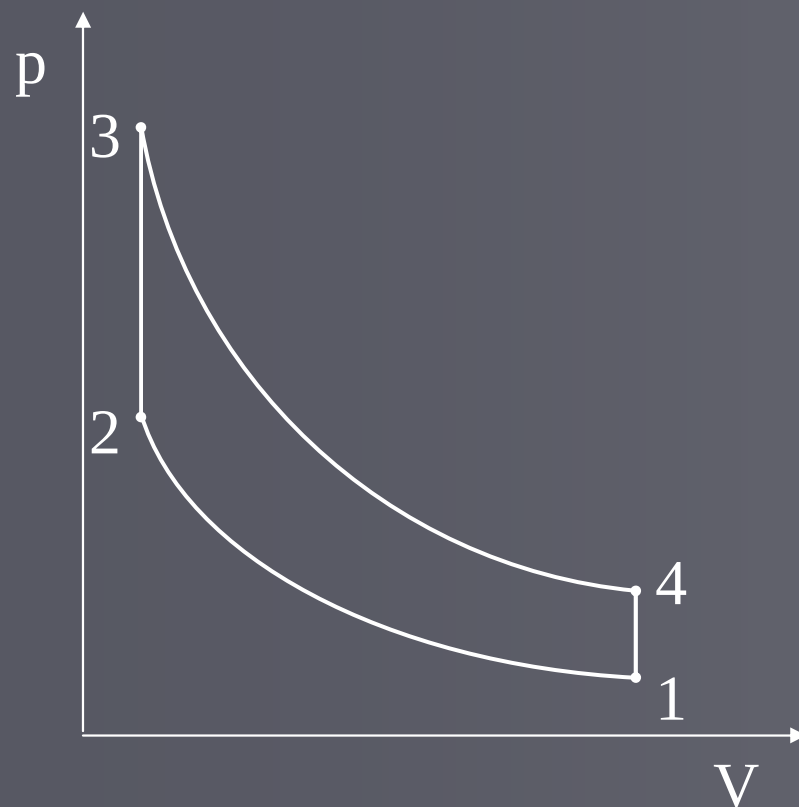
T



S

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna



Silniki spalinowe

Obieg termodynamiczny równoważny przebiegowi pracy silnika ZI nazywany jest obiegiem Otta.

Silniki spalinowe

$$\eta_t = \frac{l_t}{q} = \frac{q + (-)q_0}{q} = 1 + \frac{(-)q_0}{q}$$

$$q = q_{2,3} = c_v \cdot (T_3 - T_2)$$

$$q_0 = q_{4,1} = c_v \cdot (T_1 - T_4) = -c_v \cdot (T_4 - T_1)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{c_v \cdot (T_4 - T_1)}{c_v \cdot (T_3 - T_2)}$$

Silniki spalinowe

$$V_1 = V_4$$

$$V_2 = V_3$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} = \varepsilon^{\kappa-1}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{\kappa-1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1 \cdot \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

Silniki spalinowe

- Sprawność teoretyczna (termodynamiczna) obiegu Otta zależy od stopnia sprężania ε i własności czynnika termodynamicznego κ (ilości atomów w cząstce gazu).
- Teoretyczna sprawność obiegu Otta dla stopnia sprężania $\varepsilon = 8$ ($\kappa = 1,4$) wynosi 56 [%].

Silniki spalinowe

- W silniku ZS wtrysk paliwa do cylindra wywołuje samozapłon powstającej mieszanki paliwowo-powietrznej.
- Spalanie jest rozciągnięte w czasie. Przyjmujemy, że w czasie spalania tłok wykonuje ruch rozprężający.
- Spalanie realizowane w trakcie rozprężającego ruchu tłoka jest interpretowane jako izobaryczne dostarczenie ciepła.
- Teoretyczny przebieg pracy silnika ZS różni się od teoretycznego przebiegu pracy silnika ZI tylko sposobem dostarczenia ciepła.

w15

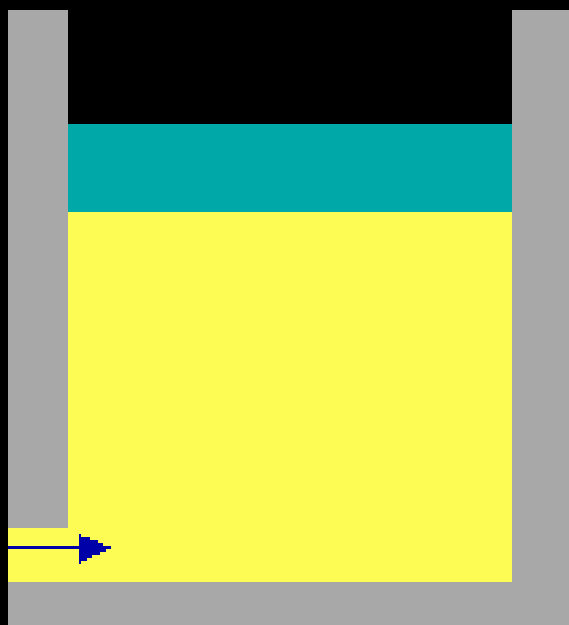
Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna

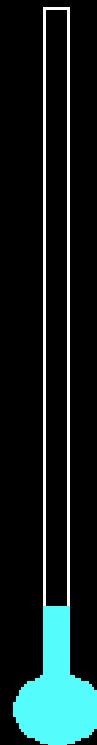
F1 to stop

F3 to restart

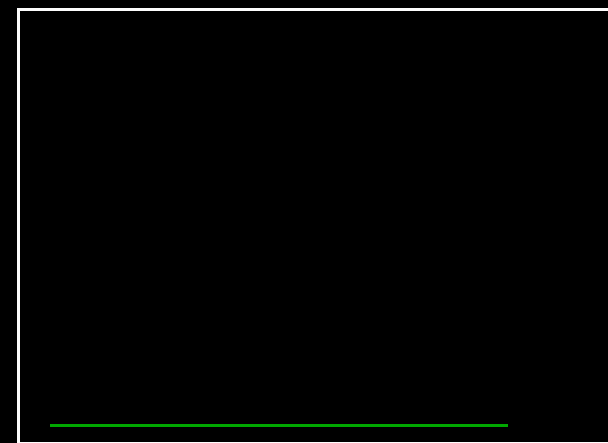
ESC for Menu



AIR INTAKE

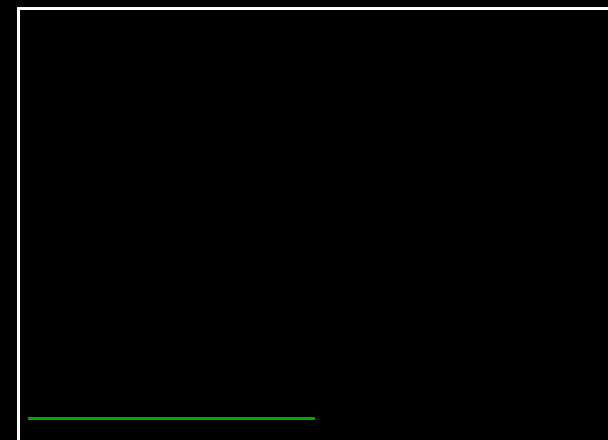


P



V

T

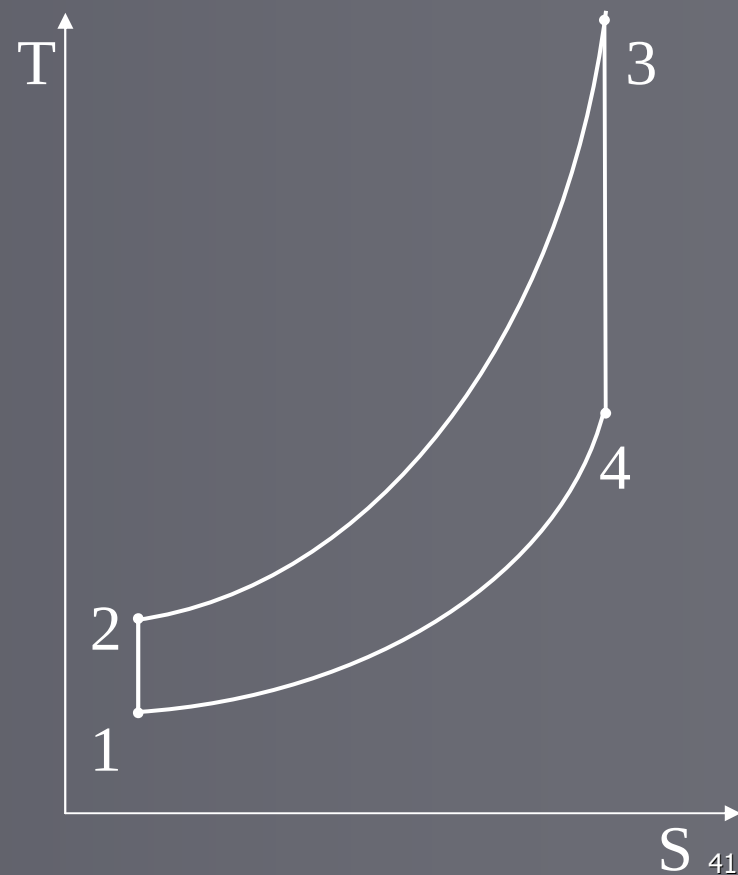
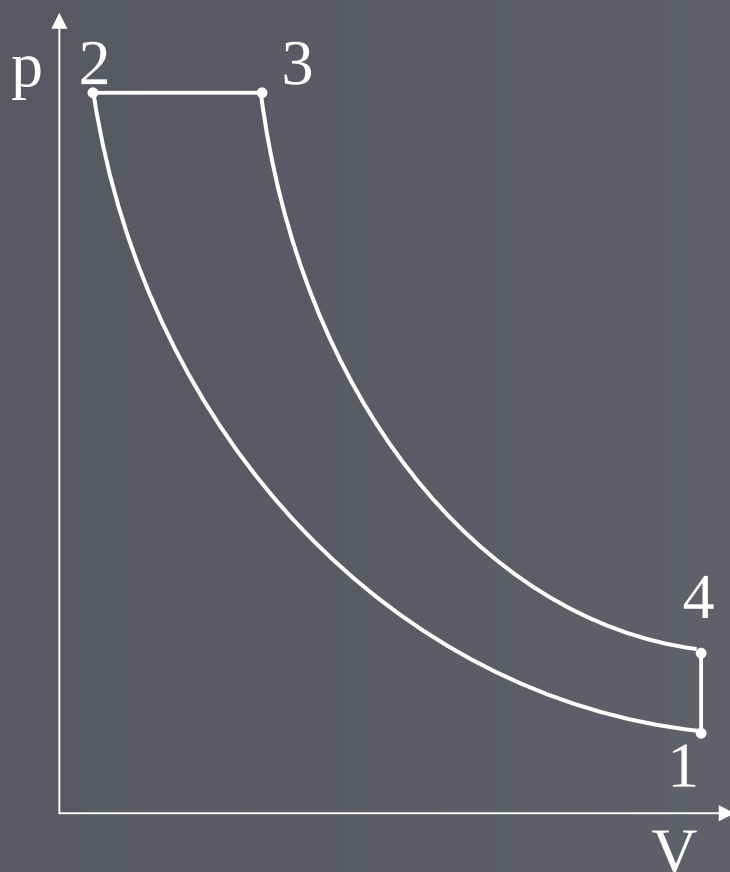


S

w15

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna



Silniki spalinowe

Obieg termodynamiczny
równoważny przebiegowi
pracy silnika ZS
nazywany jest obiegiem
Diesla.

Silniki spalinowe

$$\eta_t = \frac{l_t}{q} = \frac{q + (-)q_0}{q} = 1 + \frac{(-)q_0}{q}$$

$$q = q_{2,3} = c_p \cdot (T_3 - T_2)$$

$$q_0 = q_{4,1} = c_v \cdot (T_1 - T_4) = -c_v \cdot (T_4 - T_1)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{c_v \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1}$$

Silniki spalinowe

$$v_1 = v_4$$

$$p_2 = p_3 \quad \varphi = \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

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

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{\kappa-1} = \left(\frac{v_3}{v_2} \cdot \frac{v_2}{v_1} \right)^{\kappa-1} = \varphi^{\kappa-1} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

Silniki spalinowe

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_4}{T_3} \cdot \frac{T_3}{T_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} = \varphi^{\kappa-1} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \varphi \cdot \varepsilon^{\kappa-1} = \varphi^{\kappa}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\varphi - 1}$$

Silniki spalinowe

Sprawność teoretyczna (termodynamiczna) obiegu Diesla zależy od stopnia sprężania ε , stosunku temperatur końca i początku spalania φ i własności czynnika termodynamicznego κ (ilości atomów w cząstce gazu).

Silniki spalinowe

Współczynnik φ ma tym mniejszą wartość, im mniejszą wartość ma objętość końca spalania.

$$\lim_{\varphi \rightarrow 1} \left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\varphi - 1} \right) = 1$$

Silniki spalinowe

$$\kappa = 2 \Rightarrow \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\varphi - 1} = \frac{1}{\kappa} \cdot (\varphi + 1)$$

$$\varphi > 1 \Rightarrow \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\varphi - 1} > 1$$

$$\varphi = 1 \Rightarrow \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\varphi - 1} = 1$$

Silniki spalinowe

- Ponieważ w silnikach ZS stosujemy dwukrotnie wyższe stopnie sprężania, niż w silnikach ZI, to sprawność silnika ZS i obiegu Diesla dla dwukrotnie wyższego stopnia sprężania może być wyższa od sprawności silnika ZI i obiegu Otta.
- Teoretyczna sprawność obiegu Diesla dla stopnia sprężania $\varepsilon = 21$ ($\kappa = 1,4$) przy spalaniu trwającym 1/8 suwu rozprężania wynosi 60 [%].

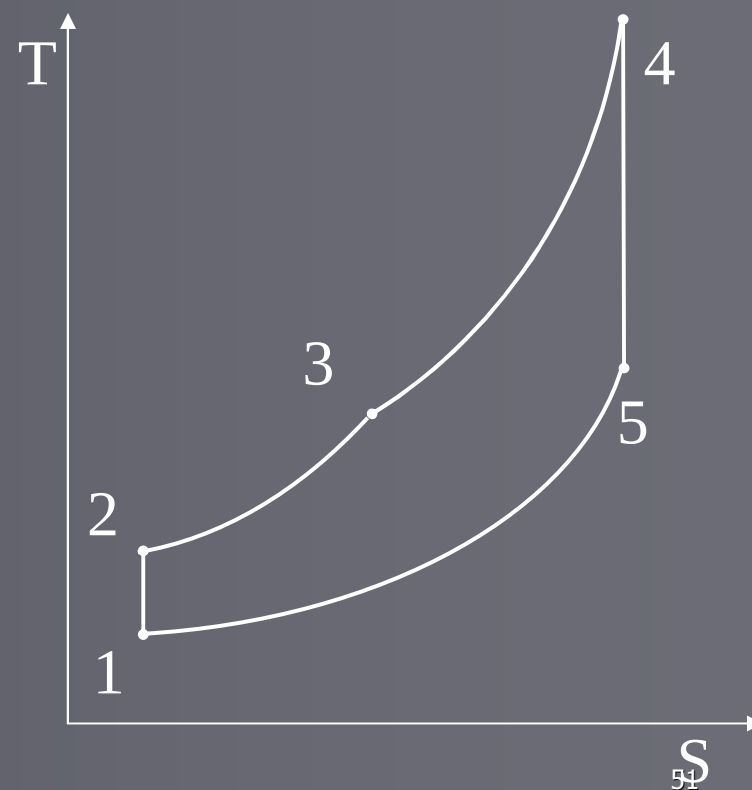
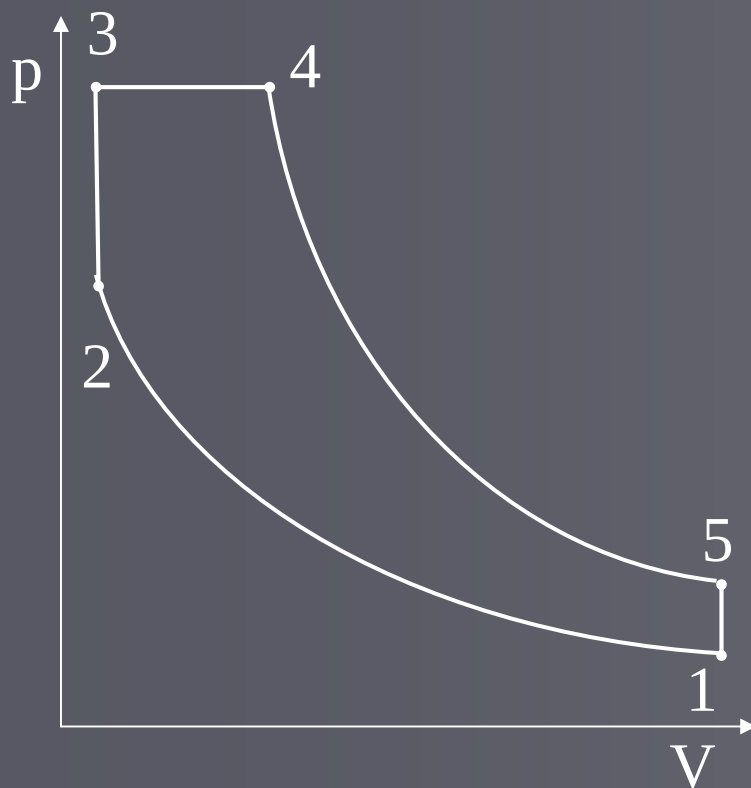
Silniki spalinowe

- Dla szybkoobrotowego silnika ZS samozapłon następuje po wtrysnięciu do komory spalania prawie całej dawki paliwa.
- Z tego względu przejawia się, że w takim przypadku spalanie częściowo jest realizowane jako proces izochoryczny, a częściowo jako proces izobaryczny.

w15

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna



Silniki spalinowe

Obieg termodynamiczny równoważny przebiegowi pracy szybkoobrotowego silnika ZS nazywany jest obiegiem Sabathego.

Silniki spalinowe

Sprawność obiegu Sabathego wynosi jest wyższa od sprawności obiegu Diesla i niższa od sprawności obiegu Otta przy tych samych stopniach sprężania.

$$\varepsilon = \text{const} \rightarrow \eta_{\text{Otta}} > \eta_{\text{Sabathego}} > \eta_{\text{Diesla}}$$

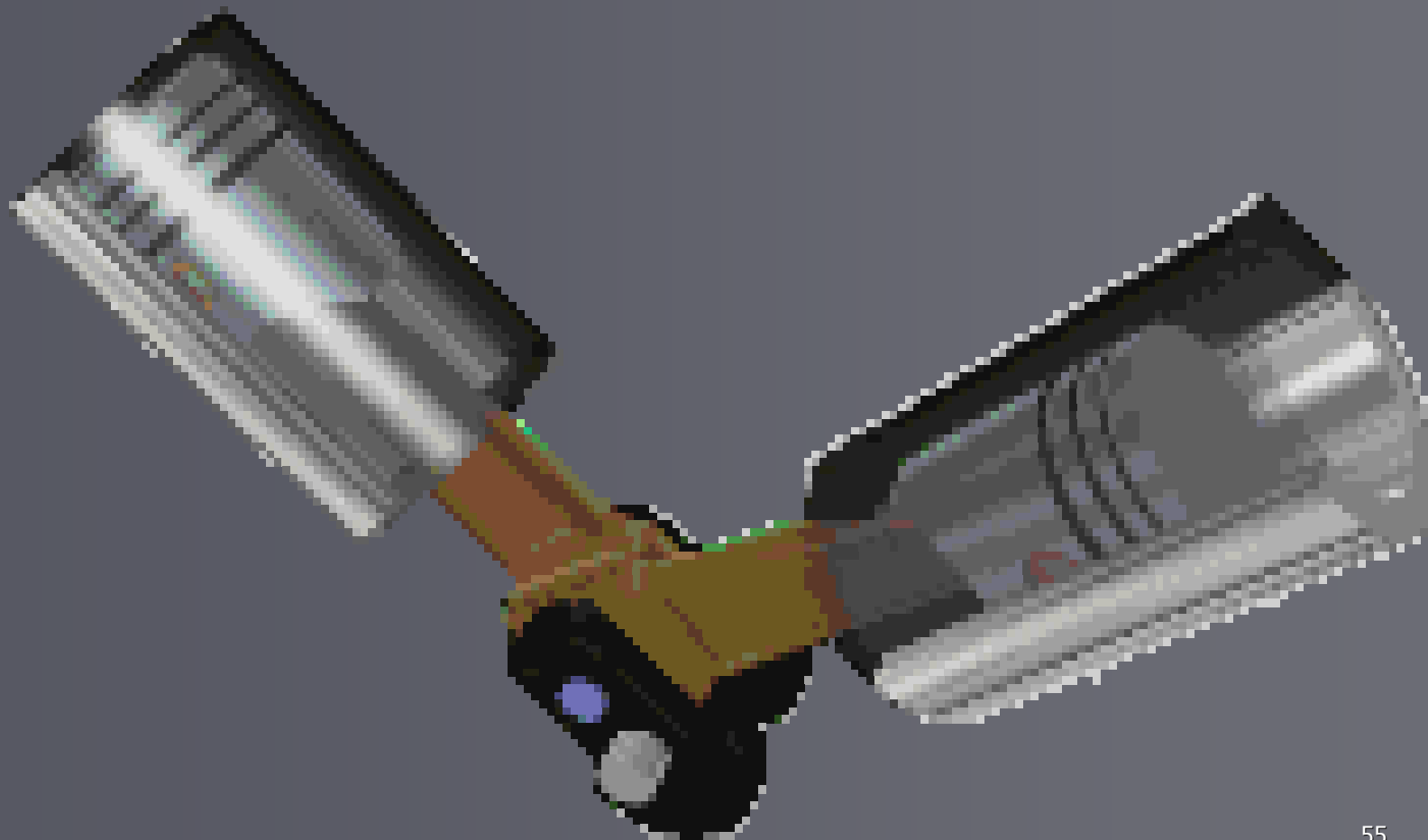
Silniki spalinowe

Uwzględniając stopień sprężania silniki ZS mają wyższą sprawność od silników ZI.

w15

Silniki spalinowe

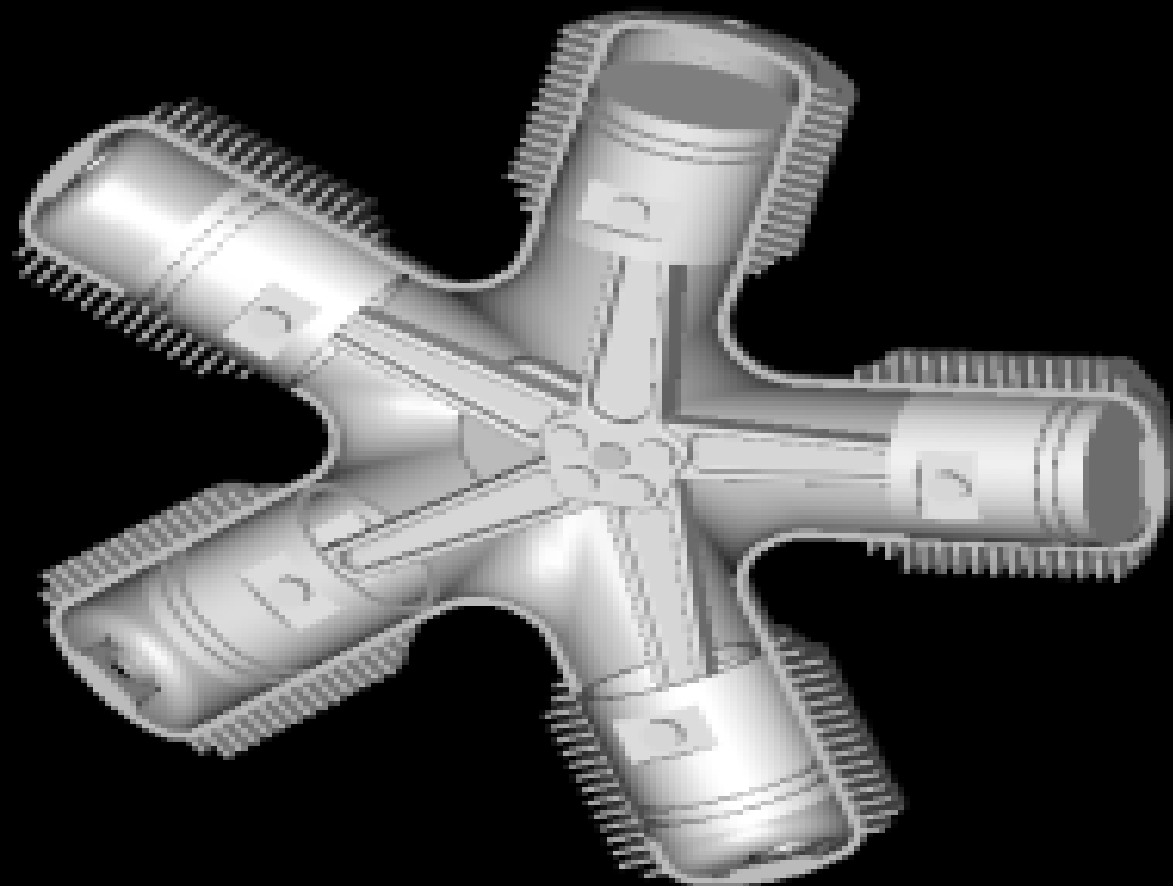
Termodynamika techniczna



w15

Silniki spalinowe

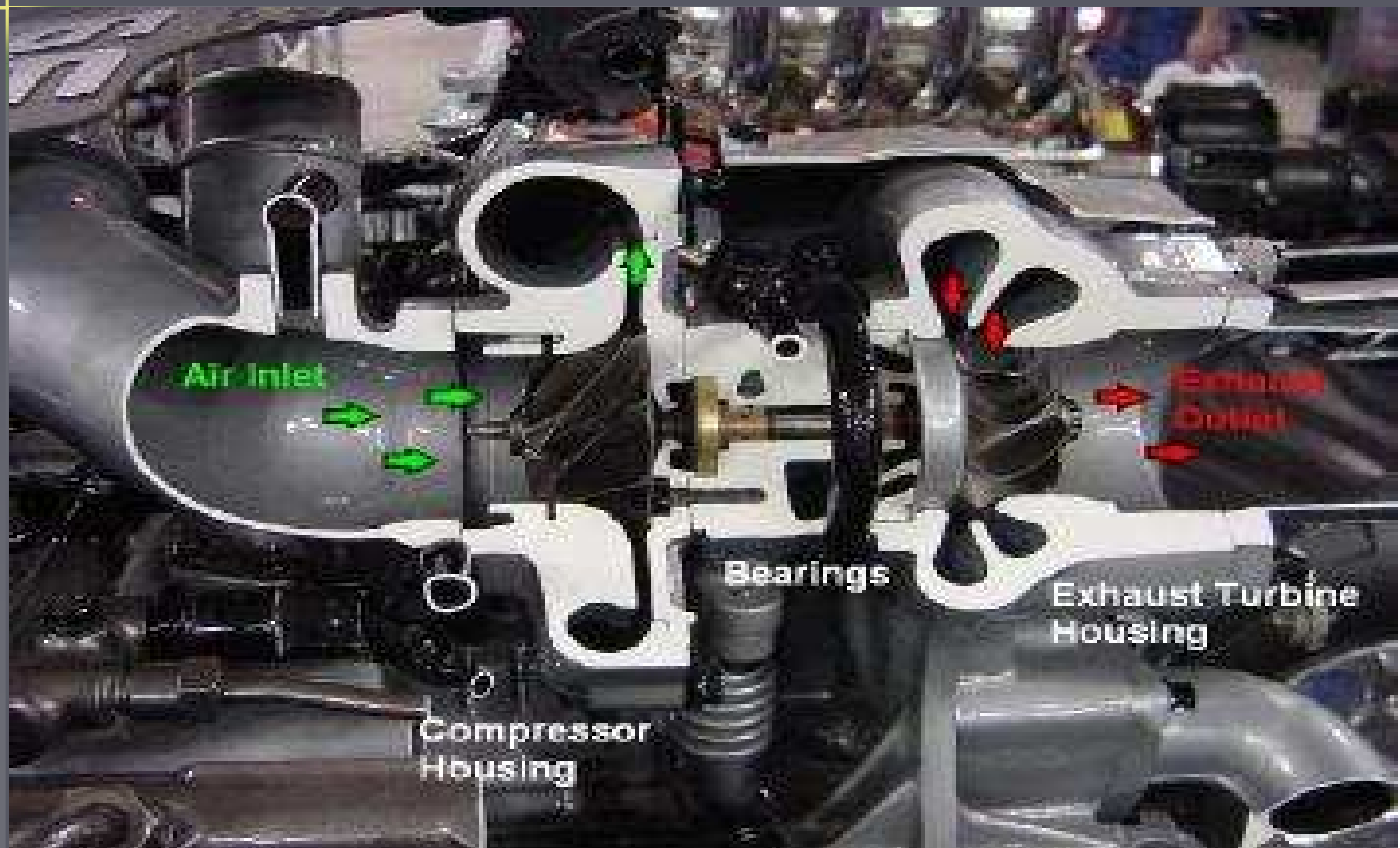
Termodynamika techniczna



w15

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna



Silniki spalinowe

- Turbina gazowa może pracować jako samodzielna maszyna i może być częścią składową turbinowego silnika spalinowego.
- Turbina gazowa nie musi być silnikiem spalinowym i może pracować w układzie zamkniętym.

Silniki spalinowe

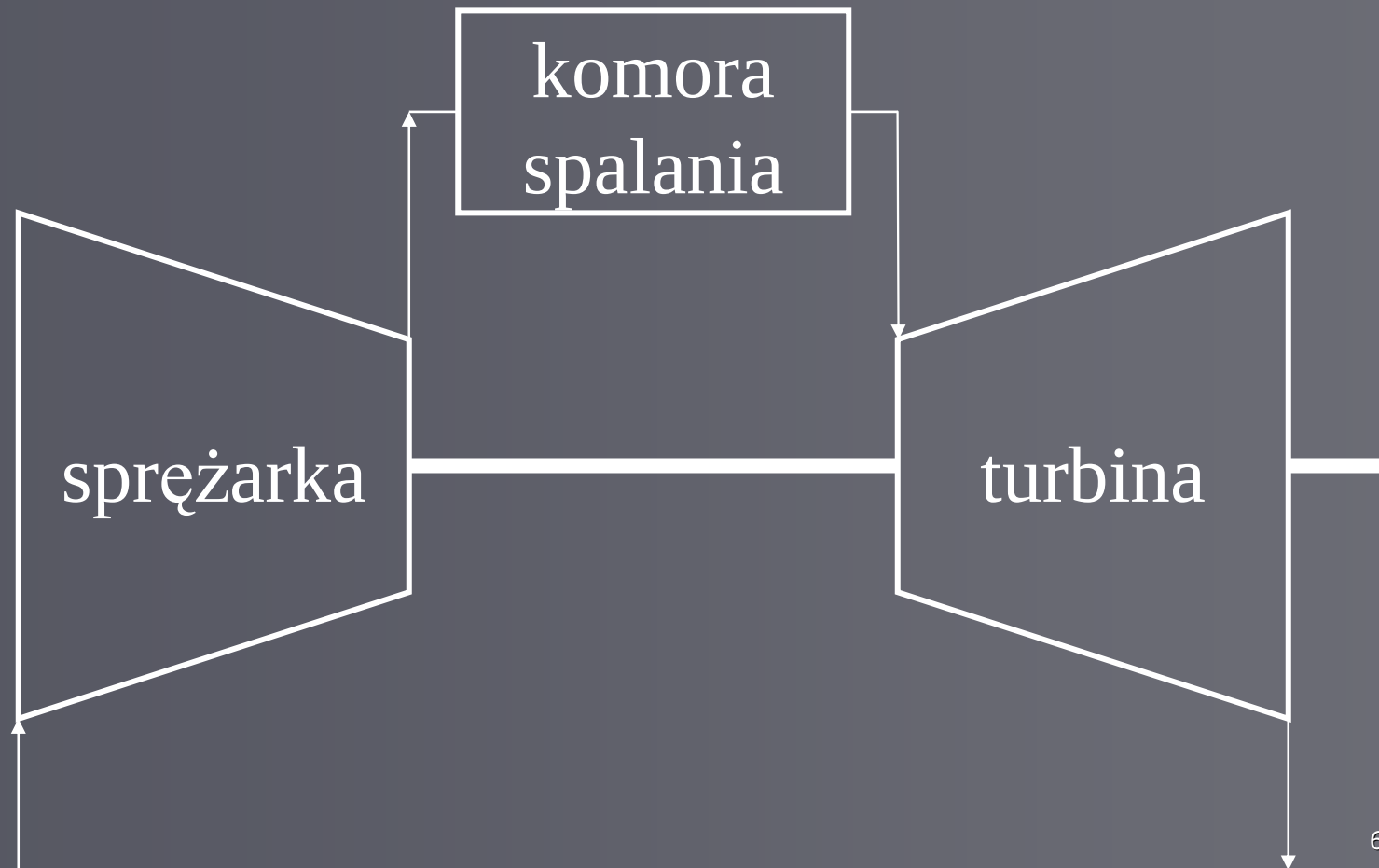
Z punktu widzenia zasady działania i obiegu termodynamicznego równoważnego pracy silnika przepływowego rozróżniamy:

- silniki turbinowe
- silniki strumieniowe
- silniki pulsacyjne.

Silniki spalinowe

Różnica między turbiną gazową, a silnikiem turbodoładowym sprowadza się do sposobu odebrania pracy z silnika.

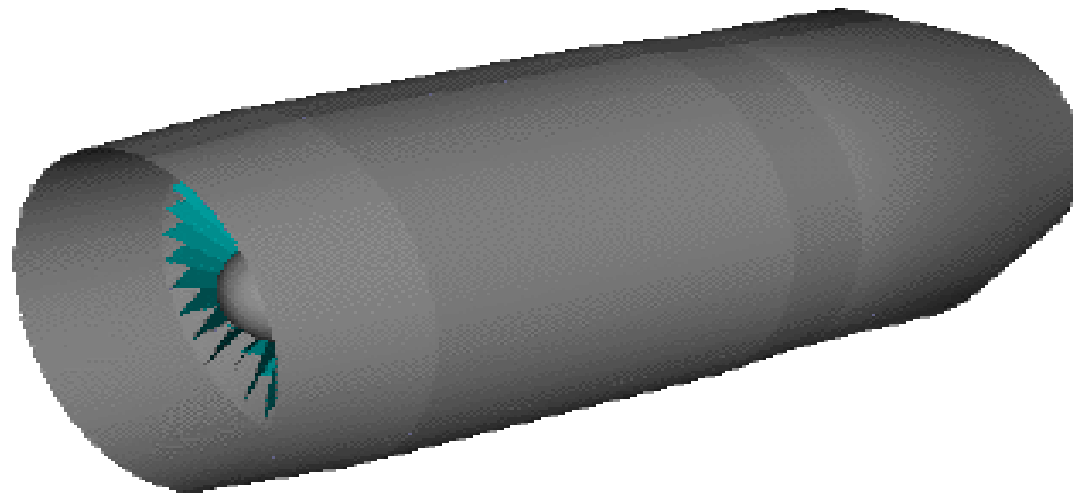
Silniki spalinowe



w15

Silniki spalinowe

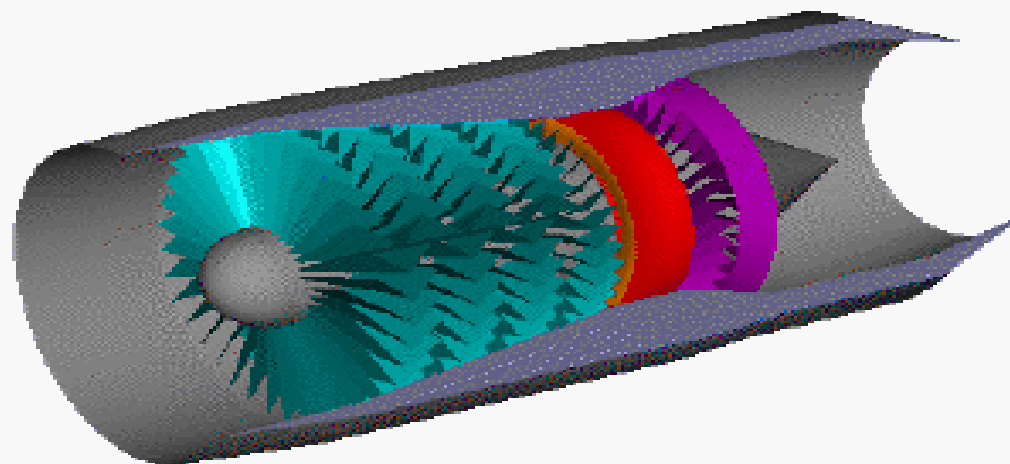
Termodynamika techniczna



w15

Silniki spalinowe

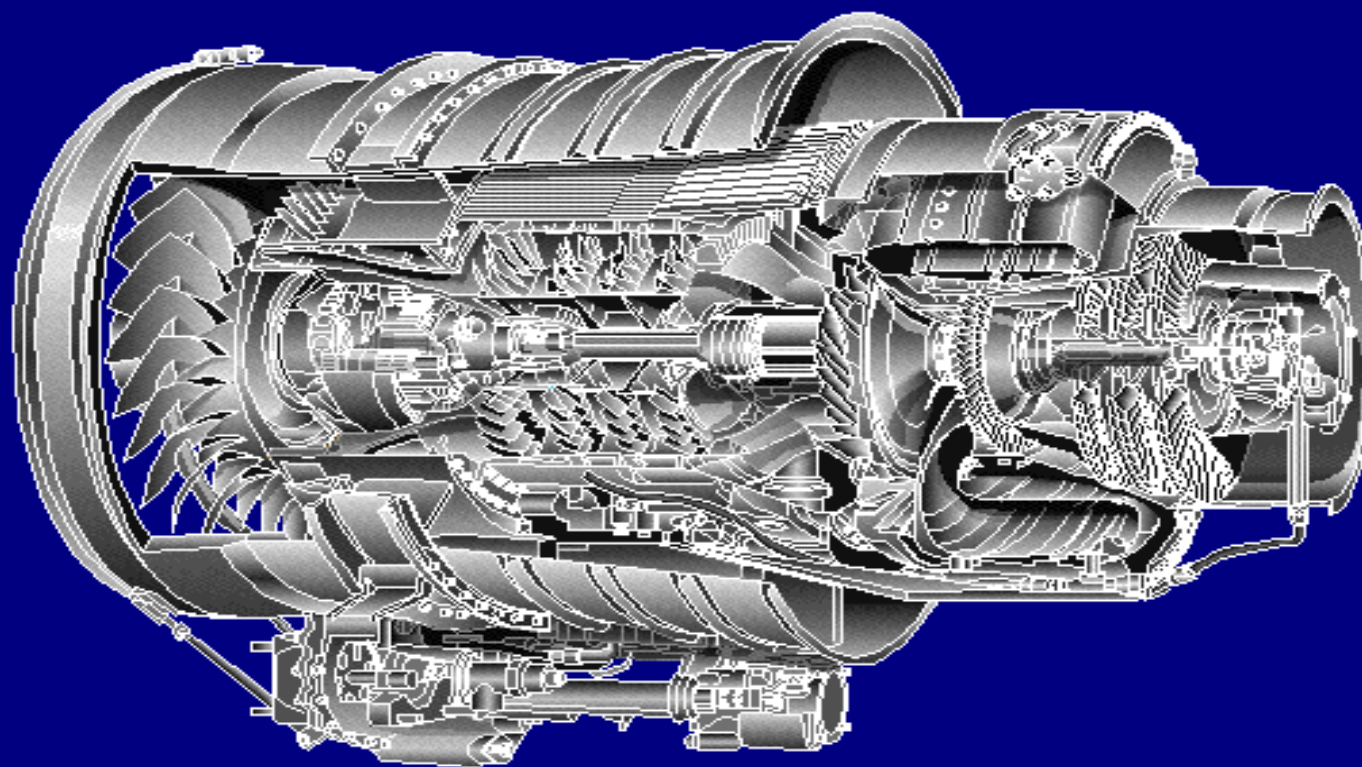
Termodynamika techniczna



w15

Silniki spalinowe

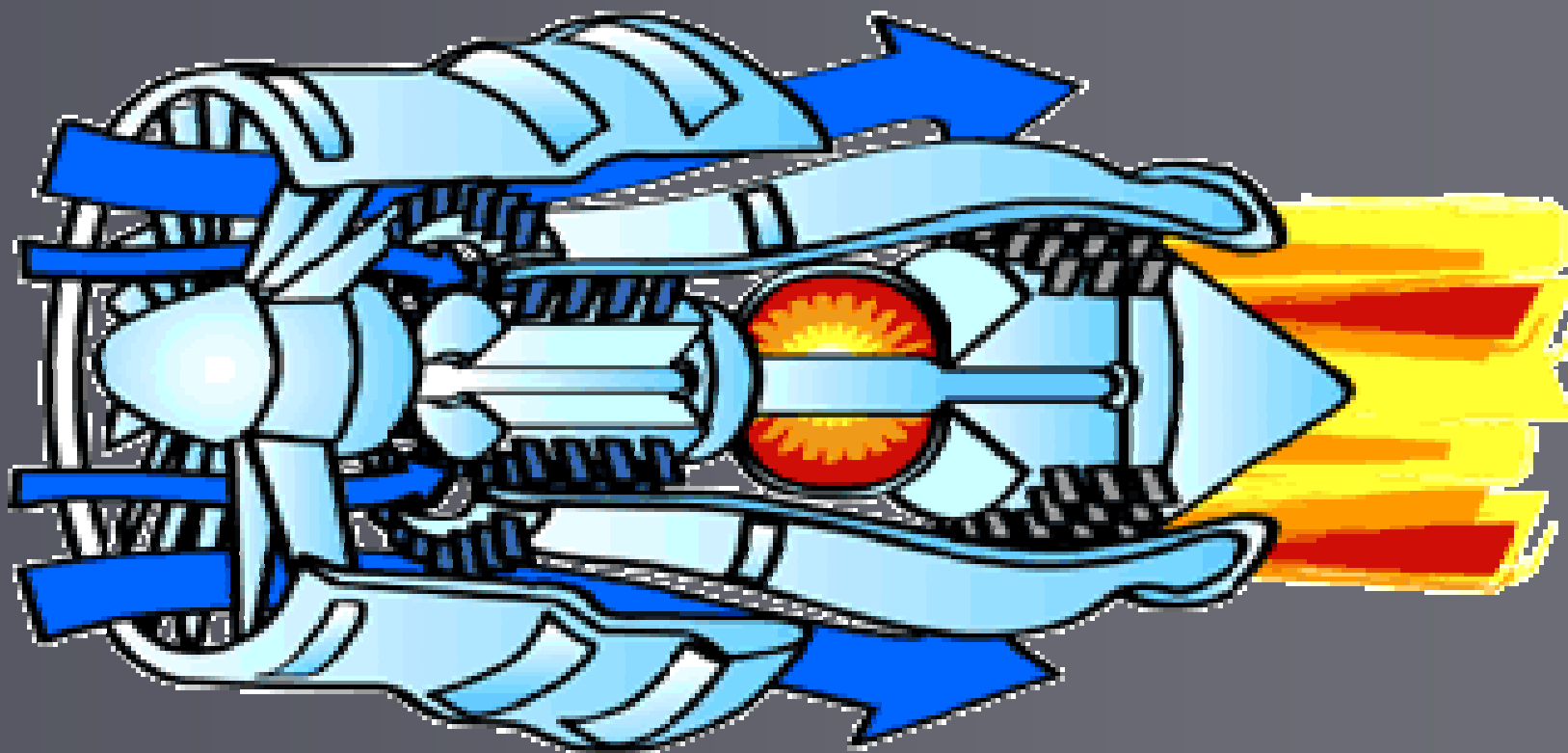
Termodynamika techniczna



w15

Silniki spalinowe

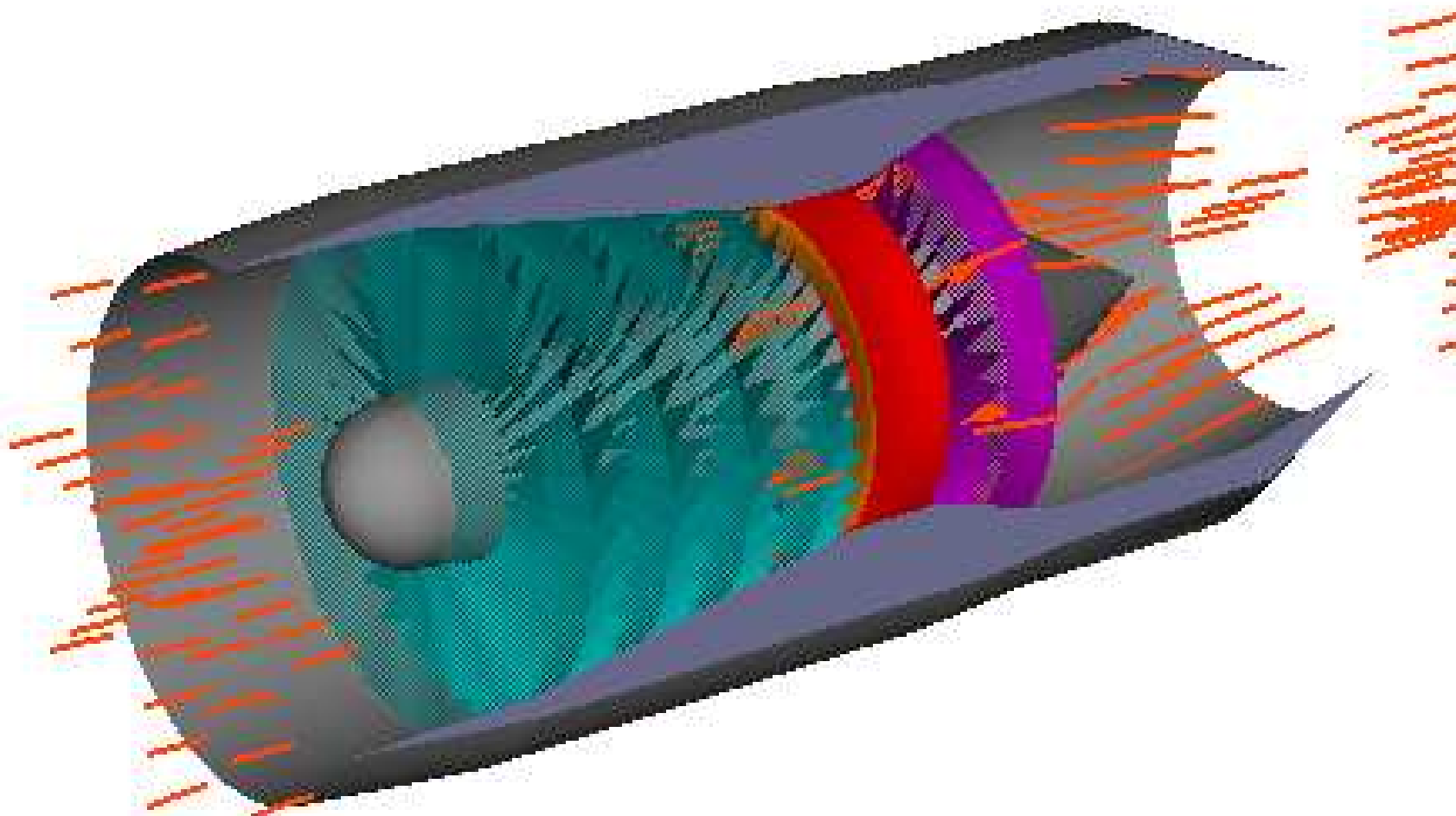
Termodynamika techniczna



w15

Silniki spalinowe

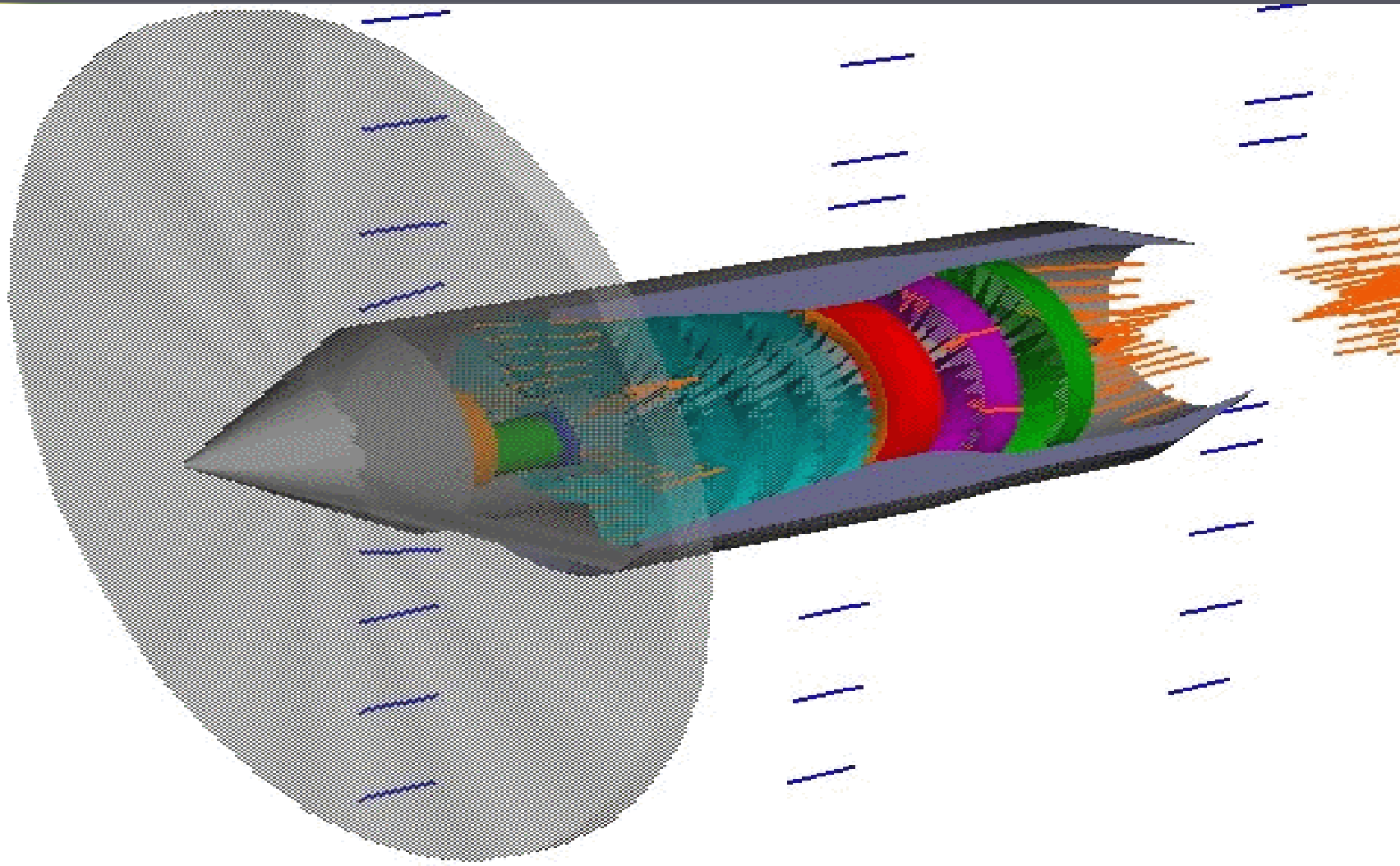
Termodynamika techniczna



w15

Silniki spalinowe

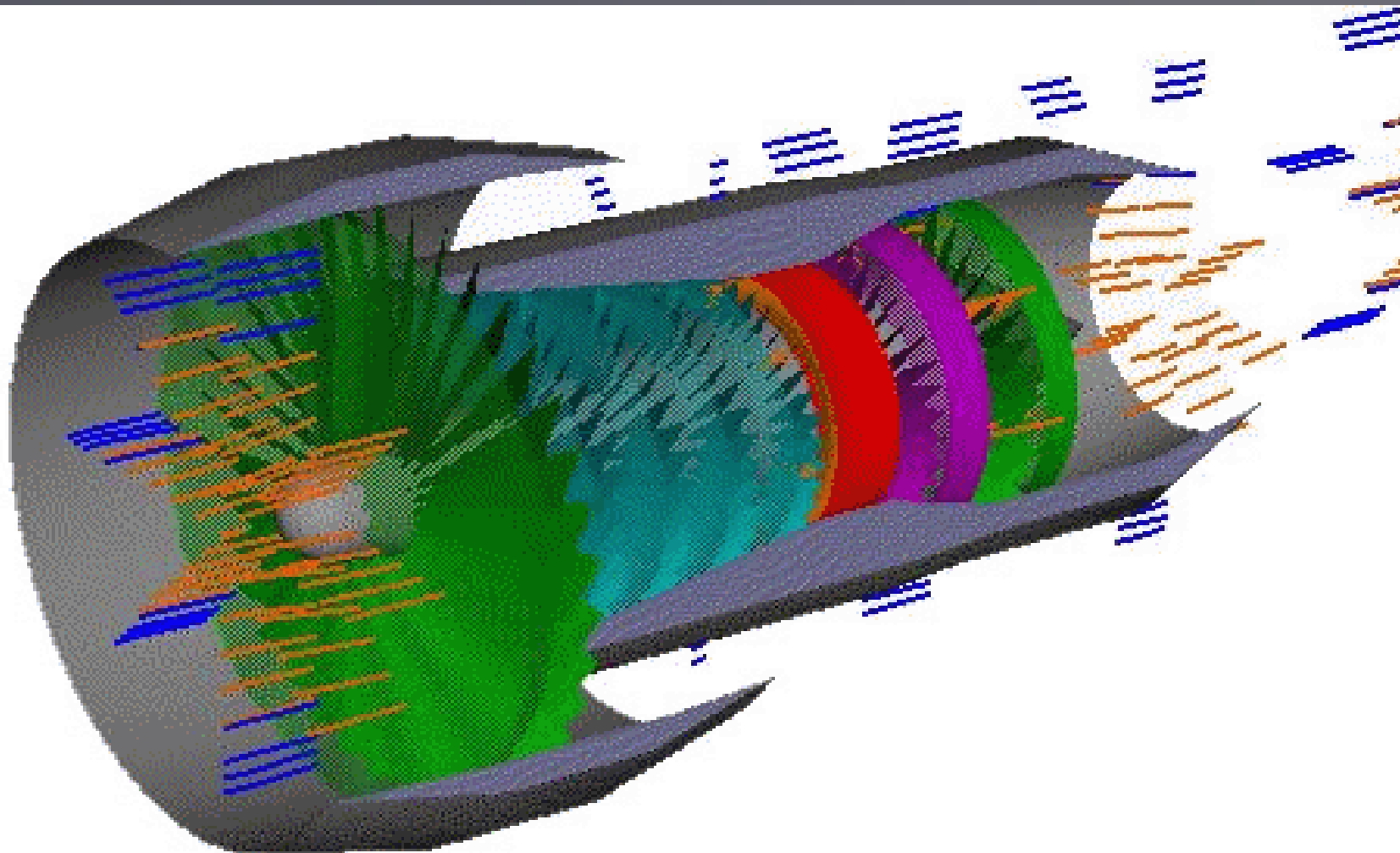
Termodynamika techniczna



w15

Silniki spalinowe

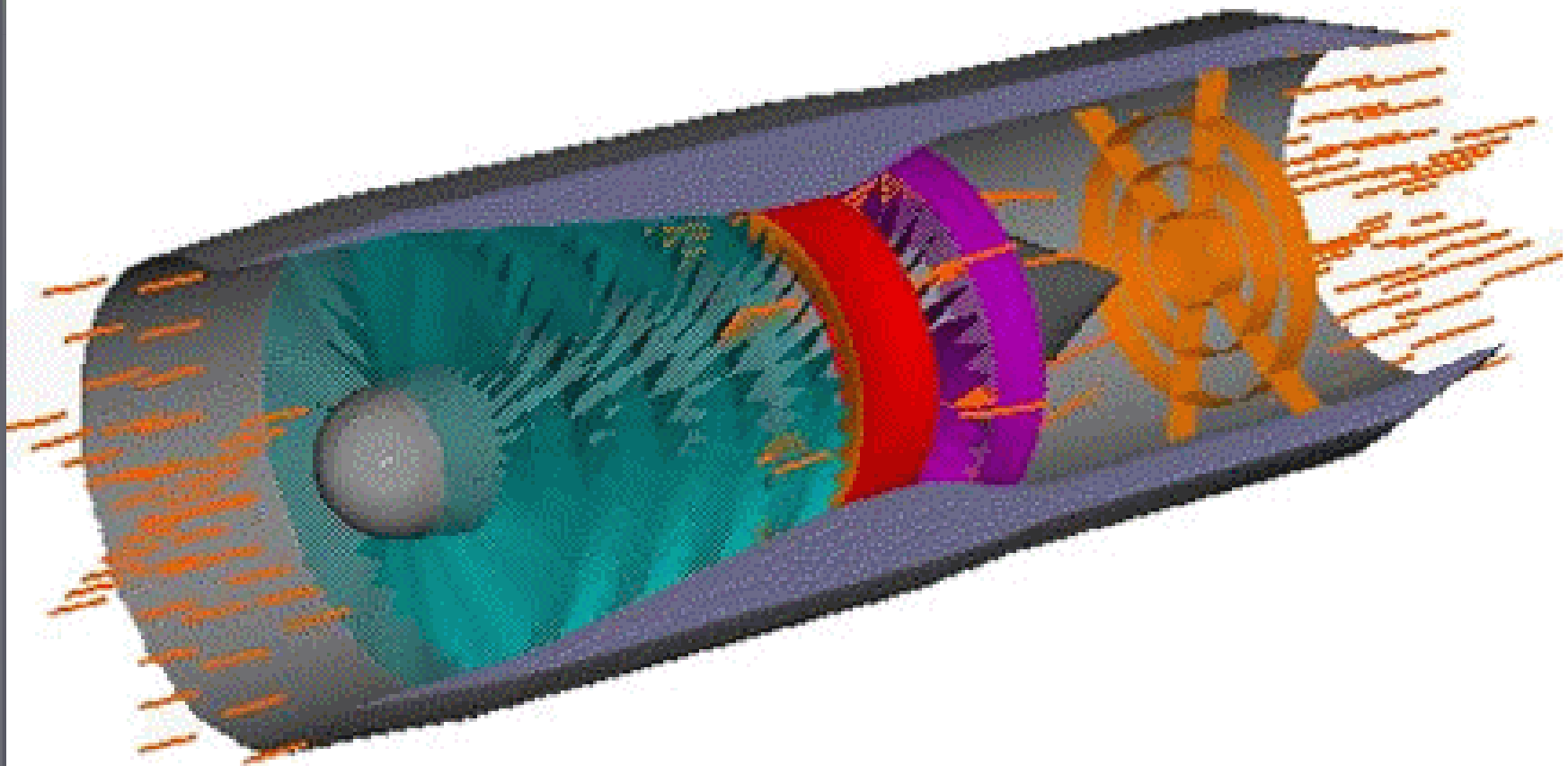
Termodynamika techniczna



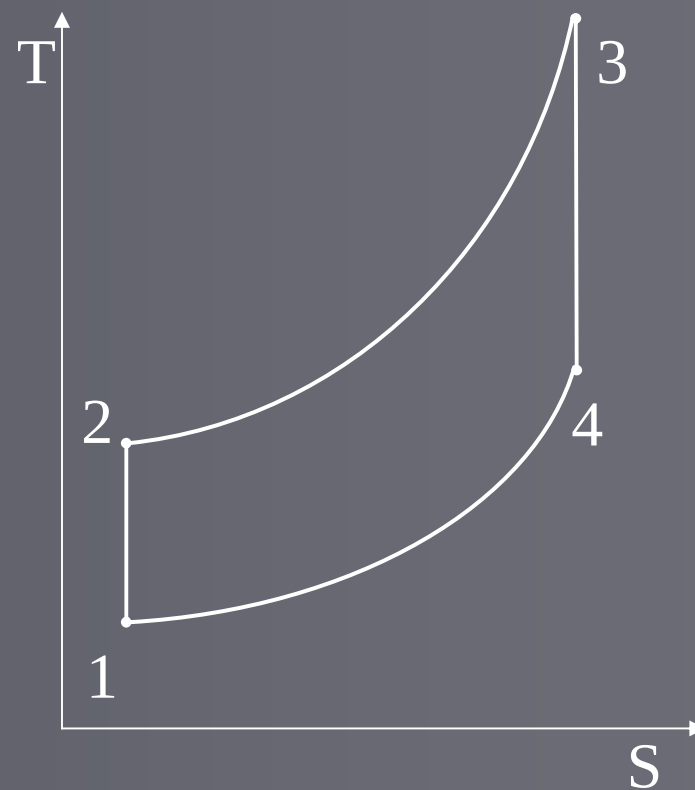
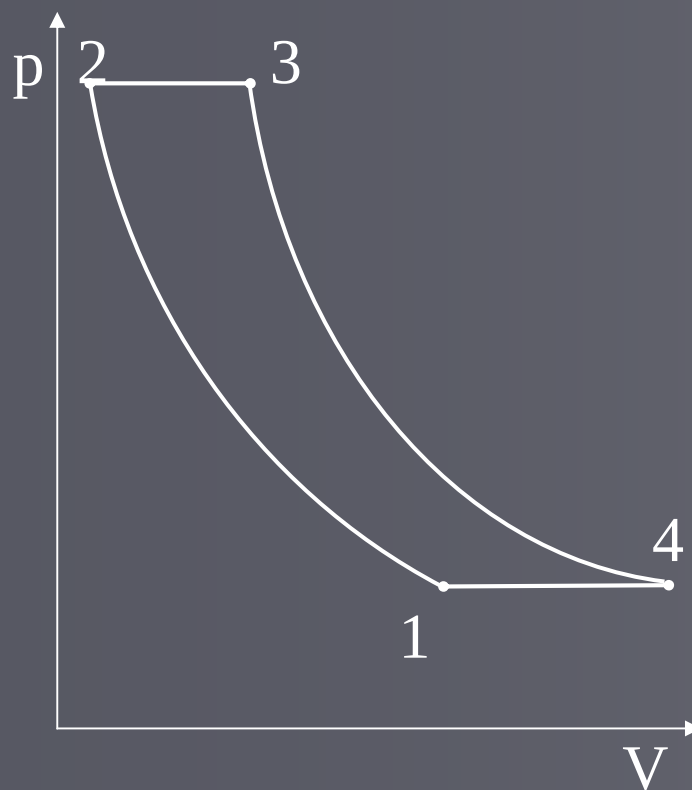
w15

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna



Silniki spalinowe



Silniki spalinowe

Obieg Joula stanowią przemiany:

- 1-2 sprężanie adiabatyczne
- 2-3 izobaryczne dostarczenie ciepła
- 3-4 rozprężanie adiabatyczne
- 4-1 izobaryczne oddanie ciepła.

Silniki spalinowe

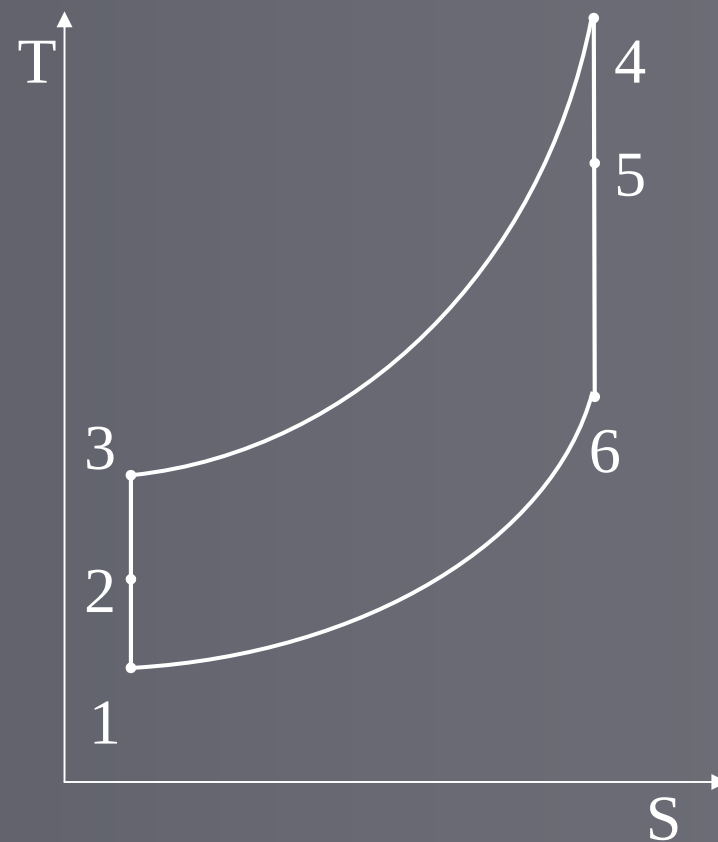
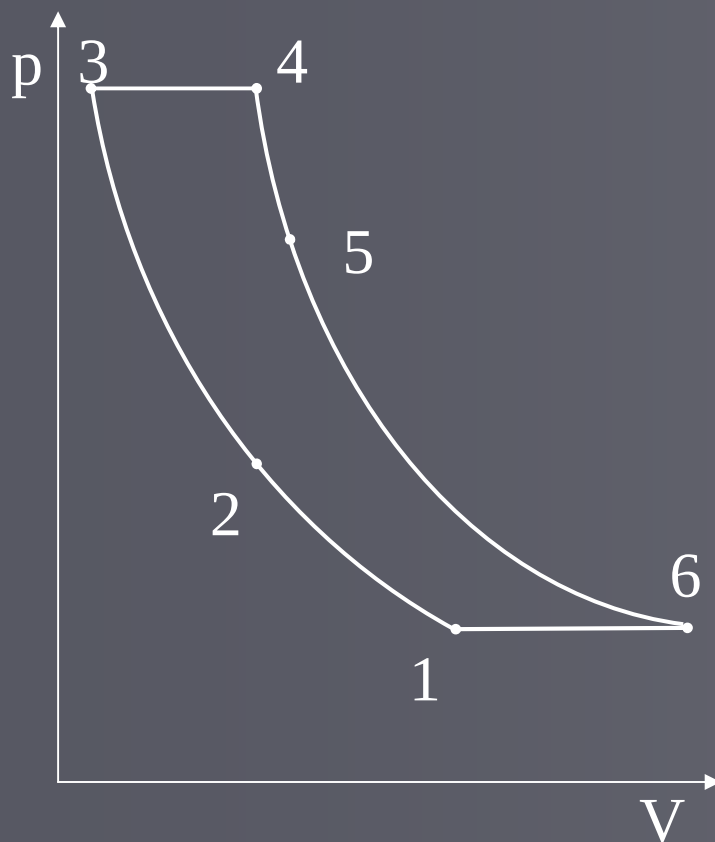
Obieg termodynamiczny równoważny przebiegowi pracy silnika turbinowego nazywany jest obiegiem Joula.

Silniki spalinowe

- Obieg Braytona jest obiegiem porównawczym silnika turboodrzutowego.
- Od obiegu Joula różni się tym, że w obiegu Braytona:
 - sprężanie adiabatyczne dzieli się na izentropowe sprężanie dynamiczne na wlocie silnika i izentropowe sprężanie w sprężarce
 - rozprężanie adiabatyczne dzieli się na izentropowe rozprężanie na turbinie i izentropowe rozprężanie dynamiczne w dyszy wylotowej.

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna



Silniki spalinowe

Obieg Braytona stanowią przemiany:

- 1-2 sprężanie adiabatyczne (dynamiczne na wlocie silnika)
- 2-3 sprężanie adiabatyczne (w sprężarce silnika)
- 3-4 izobaryczne dostarczenie ciepła
- 4-5 rozprężanie adiabatyczne (na turbinie silnika)
- 5-6 rozprężanie adiabatyczne (dynamiczne na dyszy wylotowej silnika)
- 6-1 izobaryczne oddanie ciepła.

Silniki spalinowe

$$\eta_t = \frac{l_t}{q} = \frac{q + (-)q_0}{q} = 1 + \frac{(-)q_0}{q}$$

$$q = q_{2,3} = c_p \cdot (T_3 - T_2)$$

$$q_0 = q_{4,1} = c_p \cdot (T_1 - T_4) = -c_p \cdot (T_4 - T_1)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{c_p \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)}$$

Silniki spalinowe

$$p_1 = p_4$$

$$p_2 = p_3$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \Pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_2}{T_1}$$

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1 \cdot \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{\Pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$$

Silniki spalinowe

- Podział sprężania adiabatycznego między wlot do silnika i sprężarkę i rozprężania adiabatycznego między turbinę i dyszę wylotową silnika nie wpływa na sprawność obiegu.
- Sprawność obiegu Braytona jest taka sama, jak obiegu Joula.

Silniki spalinowe

- Wzrost sprężu oznacza podniesie ciśnienia końcowego sprężania, a co za tym idzie także końcowej temperatury sprężania.
- Maksymalna temperatura obiegu (T_3) jest ograniczona wytrzymałością termiczną łopatek turbiny.
- Wzrost sprężu zwiększa sprawność silnika turbinowego i obniża ilość ciepła, jaką można pobrać bez przekraczania temperatury maksymalnej.
- Przy pewnych parametrach obiegu praca obiegu osiągnie wartość maksymalną.

Silniki spalinowe

$$l_t = l_{turbin} - l_{sprezarki}$$

$$l_t = (i_3 - i_4) - (i_2 - i_1)$$

$$l_t = c_p \cdot (T_3 - T_4) - c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Silniki spalinowe

$$l_t = c_p \cdot \left[T_3 \cdot \left(1 - \frac{T_4}{T_3} \right) - T_1 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \right]$$

$$\tau = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \Pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad T_3 = T_{\max} \quad T_1 = T_o$$

$$l_t = c_p \cdot \left[T_{\max} \cdot \left(1 - \frac{1}{\tau} \right) - T_o \cdot (\tau - 1) \right]$$

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna

$$\frac{dl_t}{d\tau} = c_p \cdot \left(\frac{T_{\max}}{\tau^2} - T_o \right)$$

$$c_p \cdot \left(\frac{T_{\max}}{\tau^2} - T_o \right) = 0$$

$$\tau_{opt} = \sqrt{\frac{T_{\max}}{T_o}}$$

Silniki spalinowe

$$\Pi = \tau^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

$$\Pi_{opt} = \tau_{opt}^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{T_{\max}}{T_o} \right)^{\frac{\kappa}{2 \cdot (\kappa-1)}}$$

Silniki spalinowe

$$\eta = 1 - \frac{1}{\prod \frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$\eta_{opt} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{T_{max}}{T_o} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa} \cdot \frac{\kappa}{2 \cdot (\kappa-1)}}$$

$$\eta_{opt} = 1 - \sqrt{\frac{T_o}{T_{max}}}$$

Silniki spalinowe

Dla temperatury maksymalnej 1100 [K] i temperatury otoczenia 300 [K] otrzymujemy

$$\Pi_{opt} = \left(\frac{1100[K]}{300[K]} \right)^{\frac{1,4}{2 \cdot (1,4) - 1}} = 9,7$$

$$\eta_{opt} = 1 - \sqrt{\frac{300[K]}{1100[K]}} = 0,478 = 47,8[\%]$$

Silniki spalinowe

Sprawność silnika turbinowego można zwiększyć przez zastosowanie:

- chłodzenia międzystopniowego
- regenerację ciepła

Silniki spalinowe

- W obu przypadkach konieczne jest zastosowanie wymienników ciepła.
- Ze względów na masę i gabaryty wymienników ciepła chłodzenie międzystopniowe i regeneracja ciepła stosowane są w układach przemysłowych (stacjonarnych).

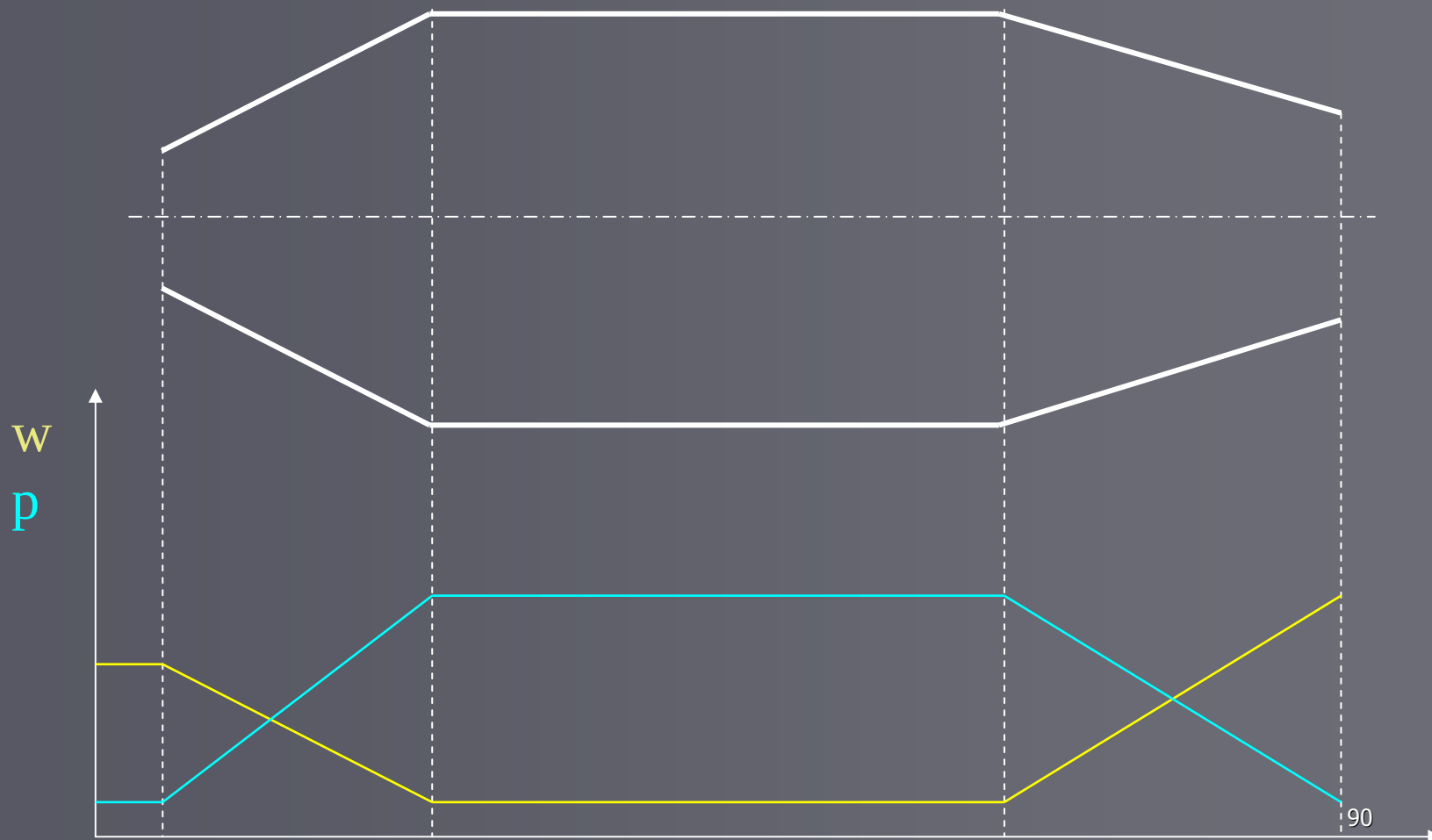
Silniki spalinowe

- Obieg Braytona stanowi obieg równoważny przebiegowi pracy w silniku strumieniowym.
- Silnik strumieniowy składa się z dyfuzora wlotowego spełniającego rolę sprężarki, komory spalania i dyszy wylotowej spełniającej rolę turbiny.

w15

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna



Silniki spalinowe

$$p_2 = p_o + \frac{\rho \cdot w^2}{2}$$

$$p_1 = p_o$$

$$\Pi = \frac{p_o + \frac{\rho \cdot w^2}{2}}{p_o} = 1 + \frac{\rho \cdot w^2}{2 \cdot p_o}$$

Silniki spalinowe

Dla poddźwiękowej prędkości lotu
 $800 \text{ [km/h]} = 222 \text{ [m/s]}$

$$\Pi = 1 + \frac{1,225 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \left(222 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \right)^2}{2 \cdot 10^5 [\text{Pa}]}$$

$$\Pi = 1,3$$

Silniki spalinowe

$$\eta = 1 - \frac{1}{\prod \frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{\frac{1,4}{1,3^{1,4-1}}} = 0,073 = 7,3[\%]$$

Silniki spalinowe

Przy prędkości naddźwiękowej 4 [M] sprawność teoretyczna silnika strumieniowego jest większa od sprawności teoretycznej silnika turbodrzutowego.

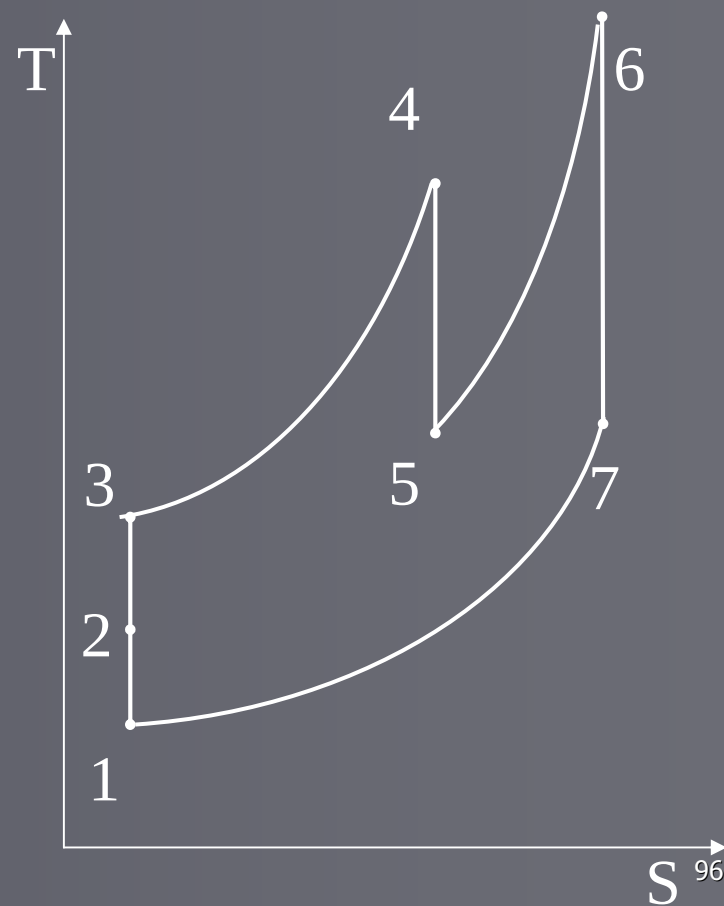
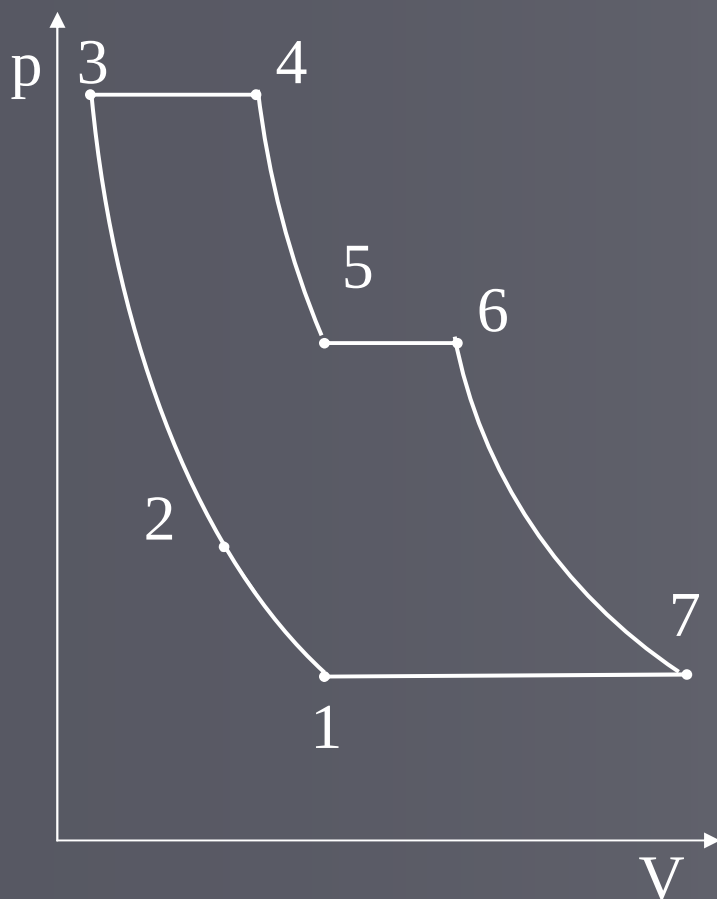
Silniki spalinowe

- W silniku turboodrzutowym możliwe jest spalanie paliwa za turbina.
- Dyszę wylotową silnika turboodrzutowego dostosowaną do spalania paliwa nazywamy dopalaczem.

w15

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna



Silniki spalinowe

Obieg silnika turbodoładowanego z dopalaczem stanowią przemiany:

- 1-2 sprężanie adiabatyczne (dynamiczne na wlocie silnika)
- 2-3 sprężanie adiabatyczne (w sprężarce silnika)
- 3-4 izobaryczne dostarczenie ciepła (komora spalania silnika)
- 4-5 rozprężanie adiabatyczne (na turbinie silnika)
- 5-6 izobaryczne dostarczenie ciepła (dopalacz)
- 5-6 rozprężanie adiabatyczne (dynamiczne na dyszy wylotowej silnika)
- 6-1 izobaryczne oddanie ciepła

Silniki spalinowe

- Maksymalna temperatura w dopalaczu nie jest ograniczona wytrzymałością termiczną łopatek turbiny.
- W dopalaczu można stosować temperatury końca spalania (T_6) rzędu 2000 [K].

Silniki spalinowe

Spalanie w dopalaczu zachodzi przy niższym ciśnieniu niż w komorze spalania:

- spręż sprężarki $\Pi = p_3/p_1$
- „spręż” dopalacza $\Pi = p_5/p_1$

Silniki spalinowe

- Sprawność dopalacza jest niższa, niż sprawność silnika turbodołrutowego
- Sprawność silnika turbodołrutowego z włączonym dopalaczem jest niższa, niż z wyłączonym dopalaczem

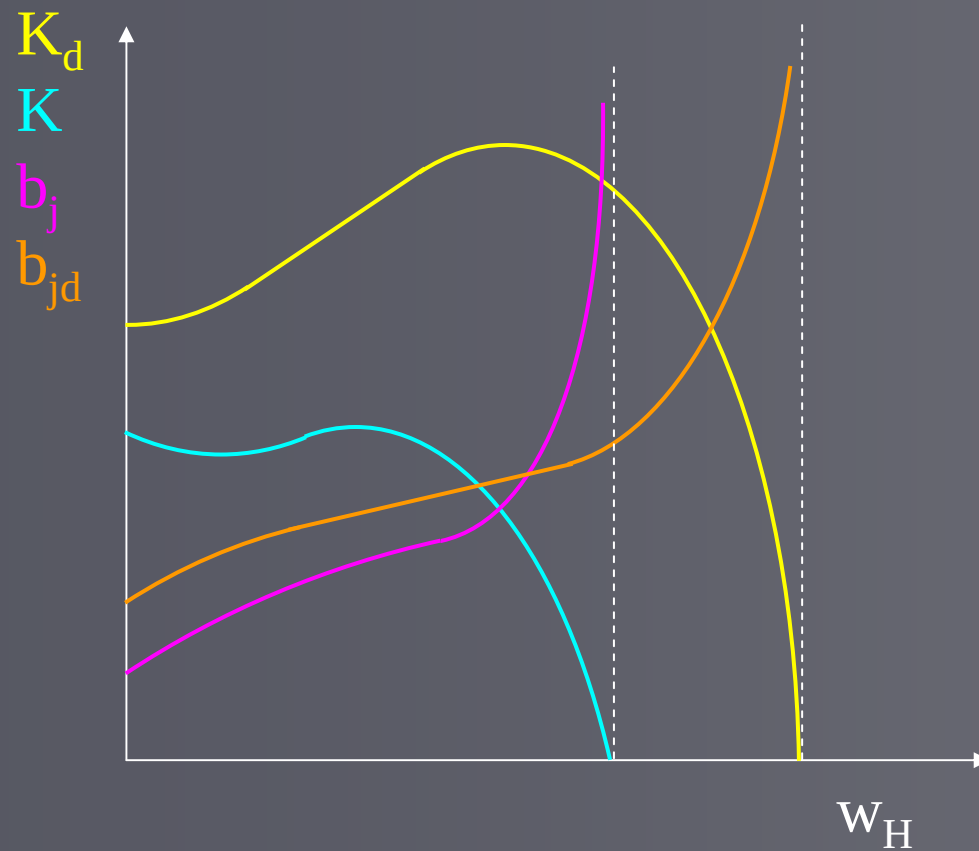
Silniki spalinowe

Dopalacz pozwala na:

- szybki wzrost ciągu silnika (K [daN]) bez wzrostu temperatury na turbinie
- lot z prędkością większą niż maksymalna prędkość lotu bez dopalacza
- zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa dla dużych prędkości lotu (b_j [kg/daN•h]).

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna



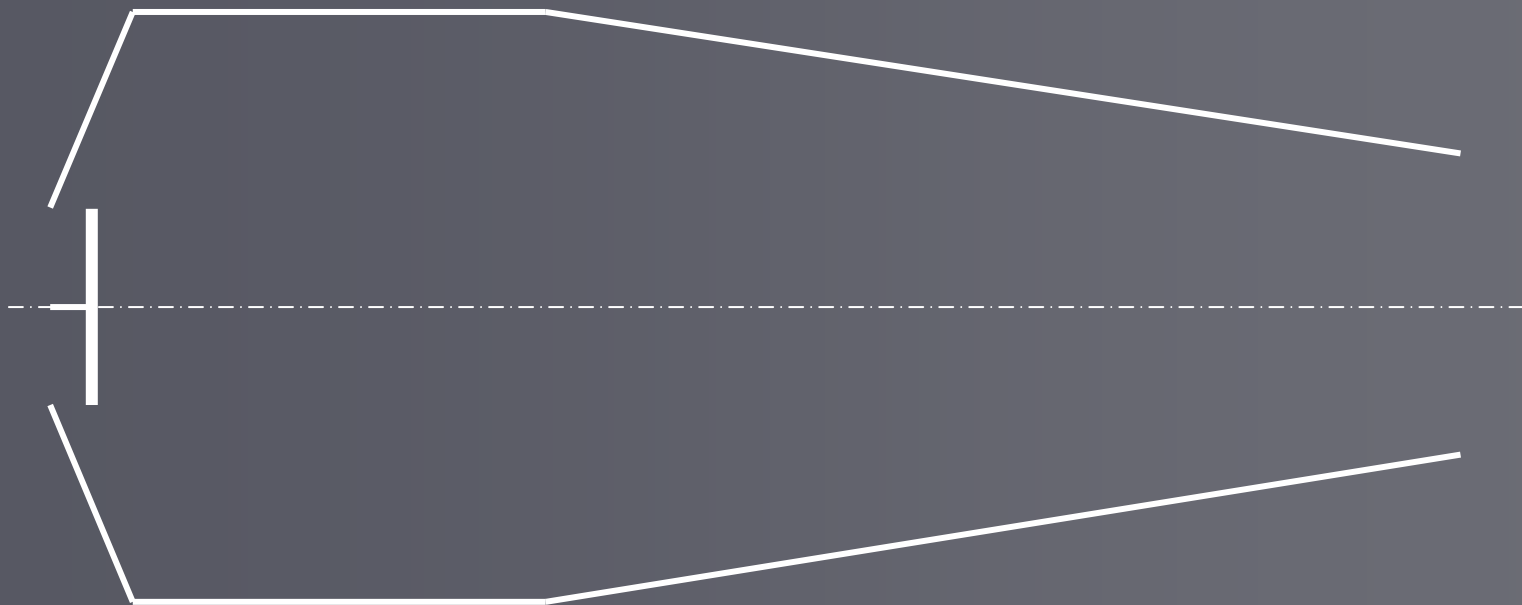
Silniki spalinowe

- Silnik pulsacyjny jest silnikiem o spalaniu izochorycznym.
- Teoretycznie możliwa jest konstrukcja silnika pulsacyjnego bezzaworowego pracującego z częstotliwością rezonansową.

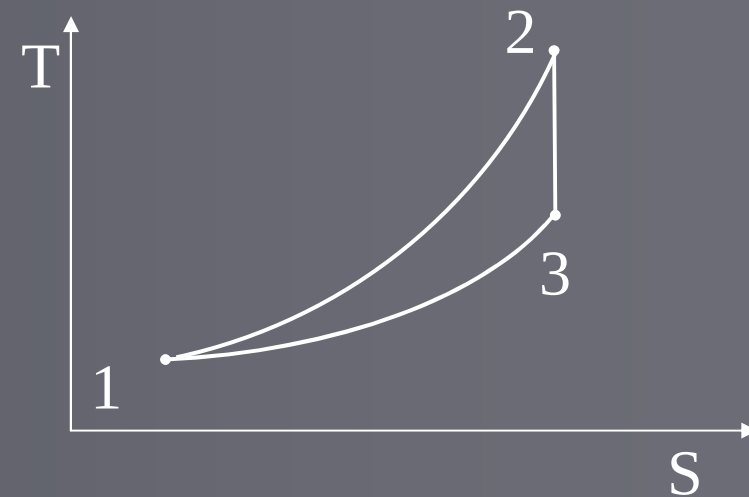
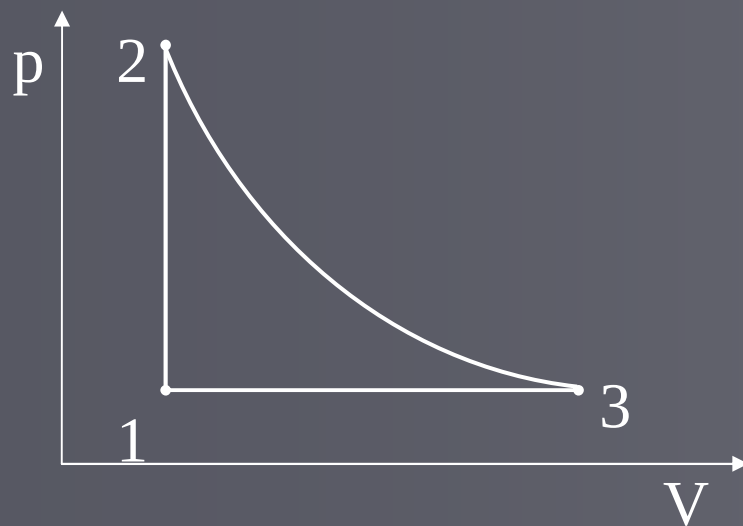
w15

Silniki spalinowe

Termodynamika techniczna



Silniki spalinowe



Silniki spalinowe

Obieg silnika pulsacyjnego stanowią przemiany:

- 1-2 izochoryczne dostarczenie ciepła
- 2-3 rozprężanie adiabatyczne
- 3-1 izobaryczne oddanie ciepła

Silniki spalinowe

$$\eta_t = \frac{l_t}{q} = \frac{q + (-)q_0}{q} = 1 + \frac{(-)q_0}{q}$$

$$q = q_{1,2} = c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

$$q_0 = q_{3,1} = c_p \cdot (T_1 - T_3) = -c_p \cdot (T_3 - T_1)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{c_p \cdot (T_3 - T_1)}{c_v \cdot (T_2 - T_1)}$$

Silniki spalinowe

$$p_1 = p_3$$

$$v_2 = v_1$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} = \lambda$$

$$\frac{T_3}{T_1} = \frac{v_3}{v_1} = \frac{v_3}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{1}{\kappa}} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} = \lambda^{\frac{1}{\kappa}}$$

Silniki spalinowe

$$\eta = 1 - \kappa \cdot \frac{T_1 \cdot \left(\frac{T_3}{T_1} - 1 \right)}{T_1 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}$$

$$\eta = 1 - \kappa \cdot \frac{\lambda^{\frac{1}{\kappa}} - 1}{\lambda - 1}$$

Silniki spalinowe

- Sprawność silnika pulsacyjnego zależy od wzrostu ciśnienia (i temperatury) podczas spalania.
- Przy wzroście ciśnienia $\lambda = 5$ sprawność teoretyczna silnika pulsacyjnego wynosi

$$\eta = 1 - 1,4 \cdot \frac{5^{\frac{1}{1,4}} - 1}{5 - 1}$$

$$\eta = 0,245 = 24,5[\%]$$

Silniki spalinowe

- Sprawność silnika pulsacyjnego jest wyższa od sprawności silnika strumieniowego.
- Ponadto w silniku pulsacyjnym nie zachodzi sprężanie dynamiczne i silnik pulsacyjny w przeciwieństwie do silnika strumieniowego rozwija ciąg przy prędkości równej zero.

Silniki spalinowe

Konieczność stosowania w silniku pulsacyjny zaworów (samoczynnych) powoduje, że silnik strumieniowy jest częściej stosowany od silnika pulsacyjnego